



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

Alo Libek

VEETÖÖTLUSE ÕPPESTENDI PROJEKTEERIMINE JA EHTAMINE

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A WATER TREATMENT STAND
FOR EDUCATIONAL USE

Magistritöö

Vesiehitus ja veekaitse õppekava

Juhendaja: professor Mait Kriipsalu, *PhD*

Tartu 2017

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö / Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Alo Libek		Õppekava: Vesiehitus ja veekaitse	
Pealkiri: Veetöötluste õppestendi projekteerimine ja ehitamine			
Lehekülgi: 80	Jooniseid: 18	Tabeleid: 8	Lisasid: 16
Osakond:		Veemajandus	
Uurimisvaldkond:		Veevarustus, Veetöötlus	
Juhendaja(d):		PhD. Mait Kriipsalu	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu, 2017	
<p>Eestit tuntakse küllaltki veerohke maana. See loob kahjuks ettekujutuse, et meie vesi kõlbab ilma töötlemata enam-vähem kõigeks. Sotsiaalministri määrus „Joogivee kvaliteedi- ja kontrollinõuded ning analüüsimeetodid“ eeldab vee-ettevõtelt veevõrku antava vee puhastamist tervisenõudeid rahuldava tulemuseni. Eesti põhjavee kvaliteet on üldjoontes hea, kuid paiguti võib vee raua-, mangaani-, ammooniumi-, kloriidi- ja fluoriidisaldus ületada norme. Alati tuleb hoida silma peal mikrobioloogilistel ja keemilistel näitajatel, et vältida joogivee tarbimisel haigestumisi ja mürgitusi. Mõningatel juhtudel on tarvis veelgi puhtamat või hoopis teistsuguste omadustega vett, kui seda on joogivesi. Seda siis, kui soovitakse pikendada kütte- või jahutussüsteemide eluiga, kasutada eriti kõrgete hügieeninõuetega vett farmaatsiatööstuses ning toidutööstuses või suunata hoopis heitvesi uuesti kasutusse.</p> <p>Paraku on liiga vähe tähelepanu pööratud vajadusele õpetada välja erialaspetsialiste, kes oskaks vee omadusi muuta energeetika-ettevõtete, raviasutuste, uurimisasutuste ja laborite, trükitööstuse, elektroonikatööstuse jms Eestile oluliste majandusvaldkondade vajaduste rahuldamiseks.</p> <p>Käesoleva töö eesmärk on tutvustada levinumaid veetöötluste meetodeid ning projekteerida ja ehitada õppestend, mille abil praktiseerida vee omaduste muutmist olenevalt tarbija vajadustele.</p> <p>Töö tulemusel projekteeriti ja ehitati stend, kuhu on koondatud seadmed seitsme Eestis enim kasutatava veetöötlustehnoloogia kohta. Õppestend sisaldab mehaanilist filtrit, liivafiltrit, aktiivsöefiltrit, aeratsioonikolooni rauaärastuseks, ionvahetuskolooni, pöördosmoosiseadet ja UV-desinfitseerimiseseadet. Lihtsasti teisaldatavat ja transporditavat stendi on võimalik käitada veevõrgu veega või ka kanistriga toodava veega. Töödeldud vee hulka ja survet saab hõlpsasti jälgida, mis võimaldab eri töötlusastme läbinud vett soovi järgi omavahel kokku segada.</p>			
<p>Märksõnad: veepuhastus, veetöötluste meetodid, joogivesi, tööstuslikvesi, filtreerimine, liiva- ja söefilter, aereerimine, rauaärastus, ionvahetus, pöördosmoos, UV-desinfitseerimine</p>			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Alo Libek		Specialty: Hydraulic Engineering and Water Pollution Control	
Title: Design and construction of a water treatment stand for educational use			
Pages: 80	Figures: 18	Tables: 8	Appendixes: 16
Department:		Water Management	
Field of research:		Water supply, Water treatment	
Supervisors:		PhD. Mait Kriipsalu	
Place and date:		Tartu 2017	
<p>Estonia is known as a country that is rich in water. Unfortunately, it creates an impression, that our water can be used for anything without processing. Regulation of the Minister of Social Affairs “Quality and Control Requirements and Analysis Methods for Drinking Water” expects waterworks to purify the water that goes into the water supply system to satisfy the needs of the health requirements. Estonian groundwater quality is mostly good, but in some areas, the content of iron, manganese, ammonium, chloride and fluoride might exceed the limit values. Microbiological and chemical parameters of drinking water should be always monitored to avoid health risks. In some cases, customers require water that is even purer or with different properties than drinking water. This is needed for cooling and heating systems; in food and pharmacy industry, where we need water with especially high hygiene requirements and in some cases, we need to re-use water. Unfortunately, too little attention has been paid to train specialists, who could change water properties to meet the needs of energetics companies, medical and research institutions along with laboratories, printing and electronic industries and for other sectors that are essential for Estonian economy.</p> <p>The aim of this work is to demonstrate the most common water treatment methods and to design the stand for educational use which allows to practice changing the water properties depending on the needs of consumer.</p> <p>As the result of this work, a stand with devices for seven most used water treatment technologies in Estonia was designed and constructed. Educational stand includes mechanical filter, sand filter, activated carbon filter, aeration column for iron removal, ion-exchange column for softening, reverse osmosis device and UV-disinfection device. This portable and mobile stand can be operated with water distribution network or with water in canisters. The amount of processed water and pressure can be easily monitored, which allows to mix differently processed water as needed.</p>			
Keywords: water purification, water treatment methods, drinking water, industrial water, filtration, sand filter, carbon filter, aeration, iron removal, ion-exchange, reverse osmosis, UV-disinfection			

SISUKORD

SISUKORD	4
SISSEJUHATUS	6
1. VEE TÖÖTLEMISE VAJADUS	8
1.1. Vee kvaliteet	8
1.2. Probleemid vee kvaliteediga Eestis	9
2. VEE TÖÖTLEMINE.....	14
2.1. Enamlevinud veetöötlusmeetodid.....	14
2.2. Filtreerimine.....	15
2.2.1. Filtreerimises toimuvad protsessid.....	15
2.2.2. Mehaaniline filter	17
2.2.3. Liivafilter	17
2.2.4. Aktiivsöe filter.....	18
2.3. Vee aereerimine	23
2.4. Raua- ja mangaaniärastus	24
2.5. Vee pehmendamine.....	26
2.6. Pöördosmoos.....	30
2.7. Desinfitseerimine	32
3. ÕPPESTEND	35
3.1. Eesmärk	35
3.2. Projekteerimine.....	35
3.3. Ehitamine	52
KOKKUVÕTE	58

SUMMARY	60
KASUTATUD KIRJANDUS	62
LISAD	64
Lisa 1. Tehnoloogiline skeem.....	64
Lisa 2. Õppestendi spetsifikatsioon	65
Lisa 3. Skeemi ühendamine jadamisi variandis 1	66
Lisa 4. Skeemi ühendamine jadamisi variandis 2	67
Lisa 5. Skeemi ühendamine rööbiti variandis 1	68
Lisa 6. Skeemi ühendamine rööbiti variandis 2	69
Lisa 7. Skeemi ühendatud aeratsioon paaris liivafiltriga	70
Lisa 8. Õhu rotameeter „Platon“ spetsifikatsioon	71
Lisa 9. Õhualdi „Tiemme“ spetsifikatsioon	72
Lisa 10. Membraanpump „Aquafilter“ spetsifikatsioon.....	73
Lisa 11. Rotameeter „GF“ spetsifikatsioon	74
Lisa 12. Nõelventiil 1/4" ja 3/8" „END-Armateur“ spetsifikatsioon	75
Lisa 13. Manomeeter „Manomer“ spetsifikatsioon.....	76
Lisa 14. PO spiraalmoodul BW60-1812-75 „DOW“ spetsifikatsioon	77
Lisa 15. Õppestendi paneeli vaated	78
Lisa 16. Õppestendi raami eskiis.....	79

SISSEJUHATUS

Veevarude nappus mõjutab maailma üha rohkem. Kroonilise puhta joogivee puuduse all kannatavate piirkondade arv järjest suureneb, eriti süveneb puhta joogivee puudus maailma kuivemates paikades. Vee globaalne osatähtsus on vaieldamatu ja seda elu eksisteerimisel Maa peal kui ka lokaalsete ökosüsteemide loomisel. Inimene vajab elamiseks vett, inimorganism sisaldab seda keskmiselt 65 %. Vesi on osa inimorganismi ainevahetusest. On karta, et tulevikus süvenevad riikidevahelised konfliktid puhta vee pärast. Vesi on elukeskkonna indikaator. Vee tähtsust pinnases ning selles elunevates organismides ei oska inimene väärtustada seni, kuni kvaliteetset joogivett on piisavalt ja soodsa hinnaga saadaval.

Põhjamaades sh. Eestis on pinna ja põhjaveevarud piisavalt suured. Paraku peame ka meie veekvaliteedi parandamisega igapäevaselt tegelema. Eesti tähtsaimaks joogiveeallikaks on põhjavesi (57,5 % ühisveevärkidest) (Birk, 2010). Põhjaveevaru kujuneb põhiliselt läbi pinnase infiltreeruvate sademete arvel. Põhjavesi läbib erinevaid pinnasekihte ja kivimeid, lahustades vette mitmesuguseid ühendeid. Eesti põhjavee kvaliteet on üldjoontes hea, kuid paiguti võib vee raua-, mangaani-, ammooniumi-, kloriidi- ja fluoriidisisaldus ületada norme. Alati tuleb silma peal hoida mikrobioloogilistel ja keemilistel näitajatel, et välistada joogivee tarbimisel haigestumisi ja mürgitusi. Eestis reguleerib joogivee kvaliteeti Sotsiaalministri 31. juuli 2001. a. määrus nr. 82 „*Joogivee kvaliteedi- ja kontrollinõuded ning analüüsimeetodid*“. Tagamaks joogivee nõuetele vastavus, vajab enamus Eestis leiduvatest veeallikatest enne olmeveena kasutamist töötlust.

Eestis on joogi-, tarbe- ja tootmisvee töötlemine laialt levinud. Vähemal või rohkemal määral töötleb vett enamus ühisveevärke. Joogivesi, mis jõuab tarbijateni, vastab ametlikele kvaliteedinõuetele. Selle eest seisavad Euroopa liit, riik ning omavalitsused. Mõningatel juhtudel on tarvis veelgi puhtamat või hoopis teistsuguste omadustega vett, kui seda on joogivesi. Seda siis, kui soovitakse pikendada kütte- või jahutussüsteemide eluiga, kasutada eriti kõrgete hügieeni nõuetega vett farmaatsiatööstuses ning toidutööstuses või suunata hoopis heitvesi uuesti kasutusse. Igal sellisel juhul vajab vesi enne kasutamist töötlemist,

kuid seda tehakse siis juba tarbimispaigas ning mitte enam ühisveevärgis. Käesoleva töö eesmärk on tutvustada levinumaid veetöötlusmeetodeid ning projekteerida ja ehitada õppestend, mille abil praktiseerida vee omaduste muutmist olenevalt tarbija vajadusest.

Õppestend projekteeriti ja ehitati nii, et peamised olmevee töötlemises kasutatavad meetodid ja seadmed on koondatud kokku piisavalt kompaktselt, et oleks võimalik stendi transportida teistesse koolitus- ja õppepaikadesse. Veetöötlusstendi peamine eesmärk on demonstreerida, et vee omadusi on võimalik väga suurtes piirides muuta, kohandades seda tarbija vajadustele vastavaks.

Magistritöö koosneb kolmest põhilisest peatükist: esmalt kirjeldatakse vee töötlemise vajadust, seejärel kirjeldatakse veetöötlusmeetodeid ja vajadust õppestendi järele. Viimases peatükis esitatakse alalõigus „projekteerimine“ stendi valmistamise lähtealused – materjal ja meetoodika ning alalõigus „ehitamine“ kirjeldatakse käesoleva töö tulemusi.

Magistritöö praktiliseks väljundiks on õppestendi ehitamine ja praktika. Magistritöö autor oli 2016. a suvel veetöötlusettevõttes Miridon OÜ praktilal, et tutvuda ettevõtte poolt pakutavate veetöötlusseadmetega, omandada teadmisi veetöötlustehnoloogiast, saada praktiline ettekujutus vee kvaliteedi probleemidest ning praktiseerida lukksepa oskusi, mida hiljem ära kasutada õppestendi ehitamisel.

Töö ajendiks oli soov täiustada veetöötlustehnoloogiata õppekvaliteeti, kuna on ilmne, et valdkonnas on pidev nõudlus selle eriala spetsialistide järgi ning EMÜ Veemajanduse osakonnas ei olnud seni ajakohased praktikavahendid piisavad. Teiseks ajendiks on soov suurendada elukutset valivate noorte hulgas huvi vesiehituse ja veekaitse eriala vastu. Õppestendiga soovitakse populariseerida ja äratada huvi eriala vastu potentsiaalsete üliõpilaste seas, tagades sellega valdkondliku arengu ja eriala kestlikkuse.

Soovin anda üle suured tänuavaldused magistritöö valmimisel kaasa aitamise eest juhendaja prof. Mait Kriipsalule, EMÜ Veemajanduse osakonna juhataja dots. Toomas Tammele, Miridon OÜ tegevdirektorile hr. Mihkel Klaassenile, projektijuhile hr. Reino Urbanovitšile ja tehnikule hr. Elmo Raudpuule. Stendi valmimist toetas Eesti Maaülikooli arengufond.

1. VEE TÖÖTLEMISE VAJADUS

1.1. Vee kvaliteet

Vett on vaja igapäevaelus hügieeniks, toidu valmistamisel, põllumajanduses ning tootmises. Sellist igapäevaelus vajalikku vett kutsutakse olmeveeks. Põhilisteks olmevee allikateks Eestis on pinnavesi (ligikaudu 40 %) ja põhjavesi (ligikaudu 60 %). Pinnavett kogutakse jõgedest ja järvedest ning tarbitakse joogiveena Tallinnas ja Narvas. Ka mõned suuremad tootmisettevõtted kasutavad pinnavett tootmises. Põjavett tarbitakse kõikjal üle Eesti. Eesti elanikkond on tarbeveega hästi varustatud. Kõigis Eesti linnades ja paljudes väikeasulates on joogiveega varustamiseks ühisveevärgid. Terviseameti 2015. aasta andmetel kasutab ligikaudu 86,15 % elanikest ühisveevärgi vett, ülejäänud osa saab vett individuaalsetest puur- ja salvkaevudest (Terviseamet, 2017). Olmevett saab oma olemuselt jaotada kaheks – joogiveeks ja tööstusveeks. Nad erinevad kvaliteedi poolest.

Joogivesi

Elanikkonna kindlustamine ohutu ja tervisliku joogiveega on üks ühiskonna prioriteete. Igapäevase elu veele võimaldab realiseerida inimese õigust elule, tervise kaitsele ja inimväärikusele. Joogivesi loetakse kvaliteedinõuetele vastavaks, kui mikrobioloogilised, keemilised, radioloogilised ning organoleptilisi omadusi mõjutavad ja üldist reostust iseloomustavad kvaliteedinäitajad ei ületa Sotsiaalministri 31. juuli 2001.a. määruses nr. 82 „*Joogivee kvaliteedi- ja kontrollinõuded ning analüüsimeetodid*“ §-des 4, 5, ja 6 esitatud piirsisaldusi. Joogivesi loetakse tervisele ohutuks, kui mikrobioloogilised ja keemilised kvaliteedinäitajad ei ületa määruse §-des 4 ja 5 esitatud piirsisaldusi.

Mikrobioloogilised ja keemilised näitajad iseloomustavad otsest ohtu tervisele. Keemiliste näitajate hulka kuuluvad näiteks antimon, arseen, benseen, boor, elavhõbe, fluoriidid, nitraadid, pestitsiidid jt. Indikaatornäitajad mõjutavad vee organoleptilisi omadusi.

Indikaatornäitajate (nt. raud, sulfaat, mangaan, kloriid jne) piirsalduste ületamisel halvenevad tarbijate vee kasutamise tingimused ning elukvaliteet ning nad võivad anda veele ebameeldiva lõhna ja maitse, kuid otsest ohtu tervisele ei ole (Terviseamet, 2017).

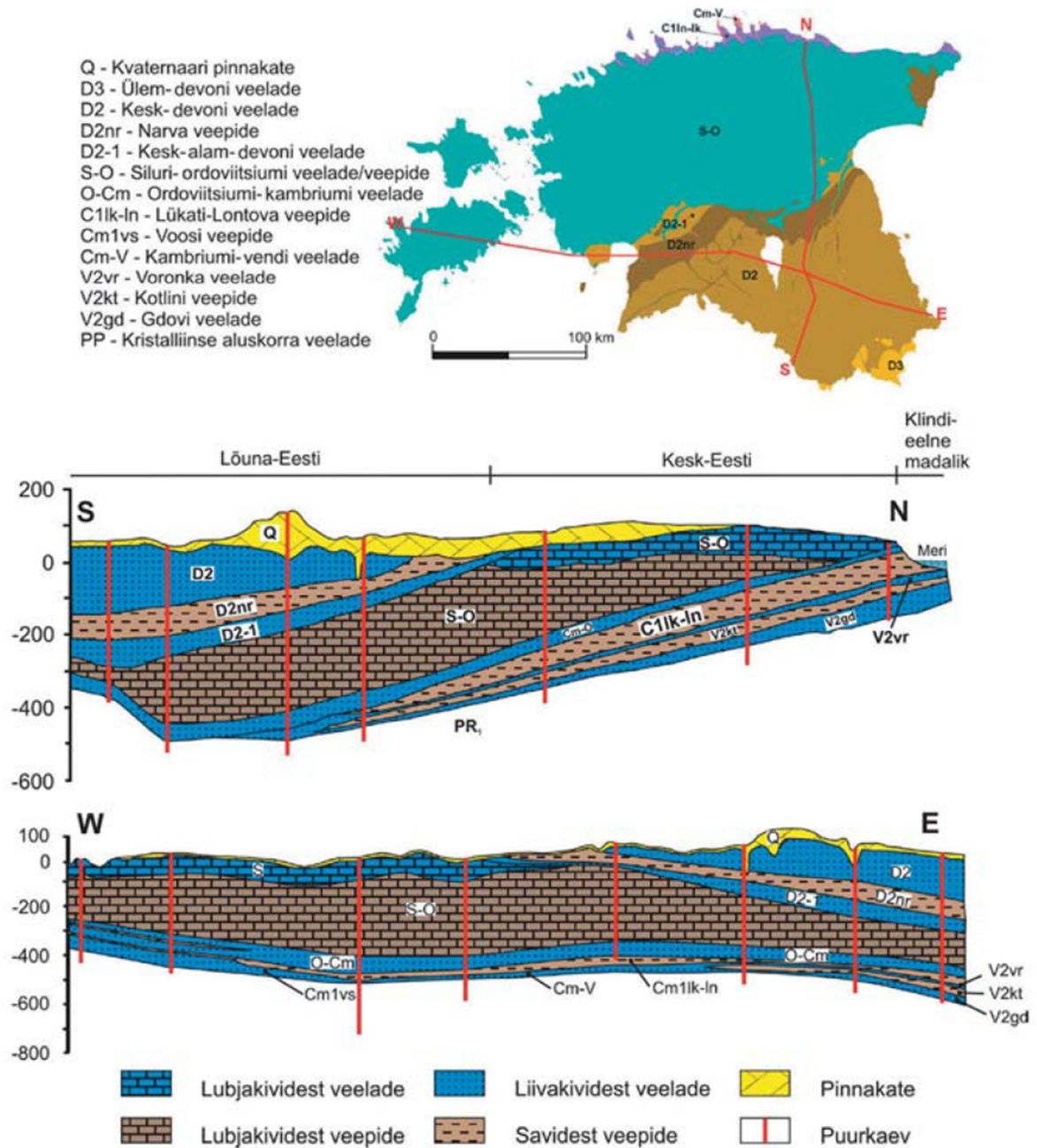
Tööstusvesi

Paljud tootmisettevõtted ja firmad ei saa tegutseda ilma, et nad kasutaks suuremat hulka vett. Sellised tööstusala nagu elektri- ja soojusenergia tootmine, ravimi- ja keemiatööstus, elektroonika ettevõtted, toiduainete- ning tekstiilitööstus kasutavad põhiliselt ainult töödeldud vett. Erilist tähtsust omab vesijahutuse- ning katlasüsteemides esinevate probleemide lahendamine nagu seda on korrosioon, katlakivi teke, muda tekkimine, mikroorganismide põhjustatud bioloogiline kinnikasvamine. Nende probleemide lahendamiseks ja vältimiseks on vaja vett hulga põhjalikumalt puhastada. Sellega välditakse seadmete rikkeid ja tööea lühenemist, energiatarbimise suurenemist ning muid häireid (Zimmermann & Pöldsepp, 2002).

Tööstusvee kvaliteet sõltub tootmise nõutest kasutatavale veele ning see määratakse tootmisega tegeleva ettevõtte poolt. Sõltuvalt tootmise veehulga vajadusest ja vee kättesaadavusest ning nõuetest vee kvaliteedile valitakse tootmisvee allikas – pinnavesi või põhjavesi. Tööstusvee veeallika valikul on kindlasti määravaks faktoriks ka vajamineva kvaliteediga vee hind, mis kujuneb pärast toorvee töötlemist.

1.2. Probleemid vee kvaliteediga Eestis

Vee kvaliteet sõltub suuresti veetekkepiirkonna hüdrogeoloogilistest tingimustest (vt. Joonis 1), mistõttu on vee koostis erinevates põhjaveekihtides ja piirkondades erinev. Vee kvaliteeti võivad halvendada ka amortiseerunud torustikud ja mahutid, vee vähene liikumine torudes, sagedased veekatkestused, avariid, reostus jpm.

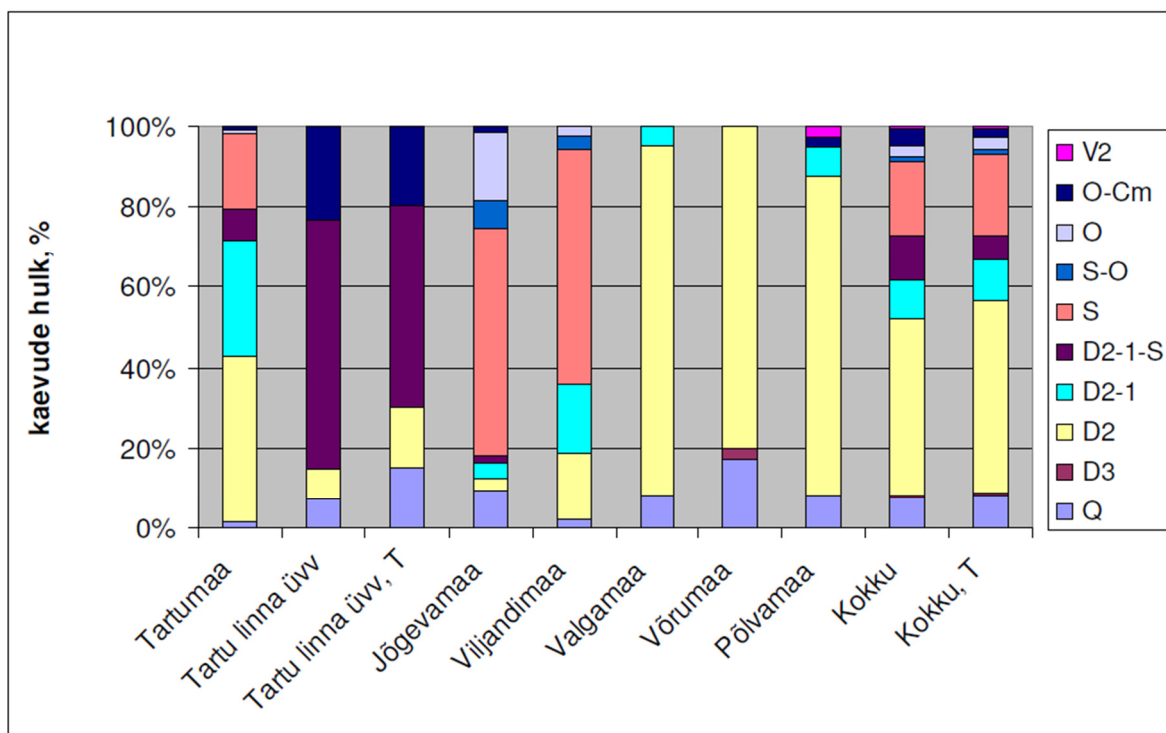


Joonis 1. Eesti hüdrogeoloogia veelademetes ja veepidemetes. Läbilõike asukohad ülémisel skeemil märgitud punasega. (Marandi & Kattel, 2010)

Tartu regioonis, mis koosneb 6. maakonnast: Jõgeva-, Viljandi-, Tartu-, Põlva-, Valga- ja Võrumaa. Tartu regioonis on kasutusel kõiki Eestis joogiveeallikana kasutatavaid põhjaveekihi, mida on kokku 7 (kvaternaari (Q), ülemdevoni (D3), keskdevoni (D2), kesk-alamdevoni (D2-1), siluri-ordoviitsiumi (S-O), ordoviitsiumi-kambriumi (O-Cm) ja kambriumvendi (Cm.V) veekihi, Joonis 1). Joonis 2 iseloomustab eri maakondades

ekspluateeritavaid põhjaveekihte protsentuaalselt kaevude hulga järgi, arvestamata nendest kaevudest välja pumbatava vee mahtudega. Eraldi on välja toodud Tartu linna ühisveevärgis kasutatavad puurkaevud ja veekihid, kuna puurkaevude arv Tartu linna ühisveevärkides on võrreldav Tartu regiooni üksikute maakondade ühisveevärkide kaevude summaga. Tartumaa kaevude hulgas ei ole arvestatud Tartu linna kaevudega (Kiidjärv, 2009).

Tartu linna ühisveevärgi puurkaevudest ligikaudu pooled on reservis (ca 40 %) või vaid aegajalt kasutuses (ca 12 %), joonisel 2 on esitatud Tartu linna ühisveevärgi andmed kahes erinevas tulbas: esimesel on näha kõigi arvel olevate puurkaevude jaotus põhjaveekihtide kaupa, teises tulbas aga on arvestatud vaid reaalselt kasutuses olevate kaevude arvuga, samamoodi on esitatud ka kokkuvõtvad tulbad (vt joonis 2 tulbad „kokku”, kus on arvestatud kõiki 606 arvel olevat puurkaevu, ja „kokku, T”, kus on kaevude baasarvuks võetud 550). (Kiidjärv, 2009)



Joonis 2. Kasutatavad põhjaveekihid Tartu regioonis (Kiidjärv, 2009)

*T - tegutsevad

Kea Kiidjärve (2009) magistritööst teemal: „*Veekvaliteedi ühisveevarustuses kasutatavates põhjaveekihtides Tartu regioonis ning sellega kaasnevate probleemide analüüs*“ selgub, et enamikele Tartu regiooni põhjaveekihtidele on iseloomulik suur kahevalentse raua sisaldus, sageli sisaldab puurkaevude vesi suures koguses kahevalentset mangaani, kohati ka ülenormatiivset ammooniumi. Kokku vajab indikaatornäitajate osas töötlemist 72 % ühisveevärgide vesi. Ca 8 % ühisveevärgide vesi sisaldab liiga palju fluoriidi, need ühisveevärgid vajavad veetötluse rakendamist, et viia vesi vastavusse Euroopa Liidu joogivee direktiivi ja SoM 31.07.2001. a määruse nr 82 nõuetega. (Kiidjärv, 2009)

Sarnaseid järeldusi teeb Leena Albreht (2004) oma magistritöös „*Viru-Peipsi alamvesikonna joogivee tervisekaitseline hinnang*“: vee tarbimisväärtus on piiratud kvaliteedinõuetele mittevastava, kuigi tervisele ohutu vee puhul, mida käesoleval ajal Viru-Peipsi alamvesikonnas tarbib 241-st ühisveevärgist üle 187 tuhande tarbija. Mittevastavust põhjustavad peamiselt suur raua-, mangaani ja ammooniumisisaldus. Kõige olulisemaks probleemiks peab Leena Albreht kvaliteetse joogiveega varustamisel liiga suurt fluoriidisisaldust mõnede veekomplekside vees, mis puudutab ligikaudu kolme ja poolt tuhandet tarbijat 14 ühisveevärgis.

Nende kahe töö alusel võib väita, et Eesti põhjavesi sisaldab lubatust rohkem rauda, mangaani, ammooniumit, paiguti ka fluoriidi ning probleeme võib olla ka väävelvesinikuga ja agressiivse CO₂'ga. Nende indikaatorite kõrvaldamiseks on vaja põhjavett enne ühisveevärki juhtimist töödelda. Samas tõdeb Kea Kiidjärv oma magistritöös, et 56 % ühisveevärgides, mille vesi sisaldab ülemäära rauda ja/või mangaani, on juba varustatud veetötlusseadmetega, millest paraku enam kui kolmandik ei tööta sihipäraselt. Võib arvata, et tänaseks on olukord paranenud, sest kõnealused uuring viidi läbi 9-14 aastat tagasi ning vee kvaliteedi parandamisse on investeeritud märkimisväärsel hulgal Euroopa Liidu raha. Olukorra paranemist kinnitab ka 2010. a juunis ajakirjas Keskkonnatehnika ilmunud Terviseameti artikkel „*Eesti joogivesi 2010. aastal*“ – samas tõdetakse, et joogivee kvaliteedi tagamisel on Eestis tööd veel palju (Birk, 2010).

Käesoleva magistritöö autor puutus vee kvaliteeti puudutavate probleemidega vahetult kokku veetötlusettevõttes Miridon OÜ praktilisel olles. Nagu näitas kogemus, on kliendid eelkõige hädas liiga kareda veega. Vee karedust põhjustavad Ca- ja Mg-ioonid. Nende esinemine looduslikus vees tuleneb peamiselt kivimite (lubjakivi, kips, dolomiit) lagunemisest. SoM 31.07.2001. a määrus nr. 82 ei reguleeri joogivee kareduse määra, kuna

see pole tervisele ohtlik – pigem on soolarikas vesi tervisele kasulik. Küll aga peetakse veekaredust oluliseks kvaliteedi näitajaks tööstusvees ning kare vesi kahjustab kütteseadmeid ja kodumajapidamises pesu- ja köögiseadmeid.

Vett soovitakse pehmenada katlakivi vältimise eesmärgil – metallide sooladel on omadus kõrge temperatuuri mõjul veest välja sadenedes muutuda tagasi “kiviks”. Katlakiviks nimetatav sade suurendab tunduvalt energiakulu küttesüsteemides ning veesoojendusseadmetes ja võib põhjustada kütteelementide läbipõlemist. Katlakivi tekib kõigis seadmetes, mille küttekehad puutuvad kokku kareda veega. Pehme vesi pikendab küttesüsteemide ja soojaveeboilerite eluiga ning suurendab nende efektiivsust. Uuringud on näidanud, et 1,6 mm katlakivi küttesüsteemide sisepindadel põhjustab 12 % soojakadu. Pehme vesi säästab puhastusvahendeid, pesupulbrit ja seepi kuni 50 % ning muudab vannitoa furnituuri hooldamise lihtsamaks. Pehme veega pestud pesu on kohev ning valge. Pehme vesi muudab vannis käimise nauditavamaks. (Miridon, 2017)

Kui kvaliteetse joogivee tagamine on ühisveevärkides saavutatud või saavutamisel, siis hoopis arvukamalt on probleeme joogiveest veelgi puhtama vee saamisega (pehmemdamine, pöördosmoos), sest siis on vee töötlemine iga kliendi enese korraldada. Kuidas seda teha või kuidas seadmeid hooldada, vajab õpetamist.

2. VEE TÖÖTLEMINE

2.1. Enamlevinud veetöötlusmeetodid

Enamlevinud veetöötlusmeetodid, mille abil saab parandada olmevee kvaliteeti, on esitatud tabelis 1.

Tabel 1. Veetöötluses põhiliselt kasutatavad meetodid ja protsessid

Meetod/Protsess	Kirjeldus	Enim kasutatav rakendus veetöötlusel
Füüsikalised protsessid		
Adsorptsioon	Orgaanilised ühendid adsorbeeritakse materjali poorsele pinnale.	Veest lahustunud orgaanika ja gaaside eemaldamine teralise aktiivsöe abil.
Aeratsioon	Vastavalt massiülekanne seadusele luuakse võimalikult suur kokkupuutepind vee ja gaasi vahel.	Põhjavee degaseerimine ning raua- ja mangaaniärastus õhuhapnikuga oksüdeerimise teel.
Filtreerimine	Veest lahustumata osakeste eemaldamine vee juhtimisel läbi teralise (mahulise) või õhukese filterkihi.	Lahustumata osakeste eemaldamine vee eel- või järeltöötlusel.
Pöördosmoos	Lahustunud osakesed mis on väiksemad kui 0,005 µm, filtreeritakse suure surve all läbi membraani	Vee demineraliseerimine, pehmdamine või teatud lahustunud reoainete (sh pestitsiidide) eemaldamine.
Ultraviolet-valgus desinfitseerimiseks	Mikroorganismid hävitatakse UV-valguse abil.	Mikroorganismidel – viiruste, bakterite ja pestitsiidide – hävitamine kemikaale kasutamata.
Keemilised protsessid		
Ioonvahetus	Protsess, kus ioonvahetus materjalil vahetatakse ioonid teiste ionide vastu.	Vee pehmdamine, demineraliseerimine, nitraatide ja bromiidide eemaldamine.

2.2. Filtreerimine

2.2.1. Filtreerimises toimuvad protsessid

Filtrimine/filtreerimine (*filtring*) on protsess, kus vesi juhitakse läbi filtri ning vees olevad saasteained jäävad filtritäite pooridesse või osakeste pinnale. (EVS-847-2-2016, 2016)

Filtritüüpe on omakorda kaks – õhukesekihiline filter, kus filtrimiseks kasutatakse kilesid, kangaid, poorseid plaate, tihedaid võrke, õhukesi pulbrikihte; ning teraline filter, kus filtrivaks materjaliks on kvartslüüva või mõne muu puistematerjali kiht. (Karu, 2016)

Filtreerimisel läbi õhukese kihi (*straining*) peetakse kinni filtermaterjali peal osakesed, mis on suuremad kui filtermaterjali võrgusilm (poori ava) või peetakse filtreeritavad osakesed kinni juba kinnipeetud osakeste massil, mille vahelt ei pääse liikuma uued kinnipeetavad osakesed (toimub filtri ummistumine). Mida peenem on filtri võrgu silm või osakestega täitunud filtri pind, seda parem tulemus on – suures võrgusilmas peetakse kinni vähem osakesi, kui väikese võrgusilmaga filtris. (Ondeo-Degremont, 2002)

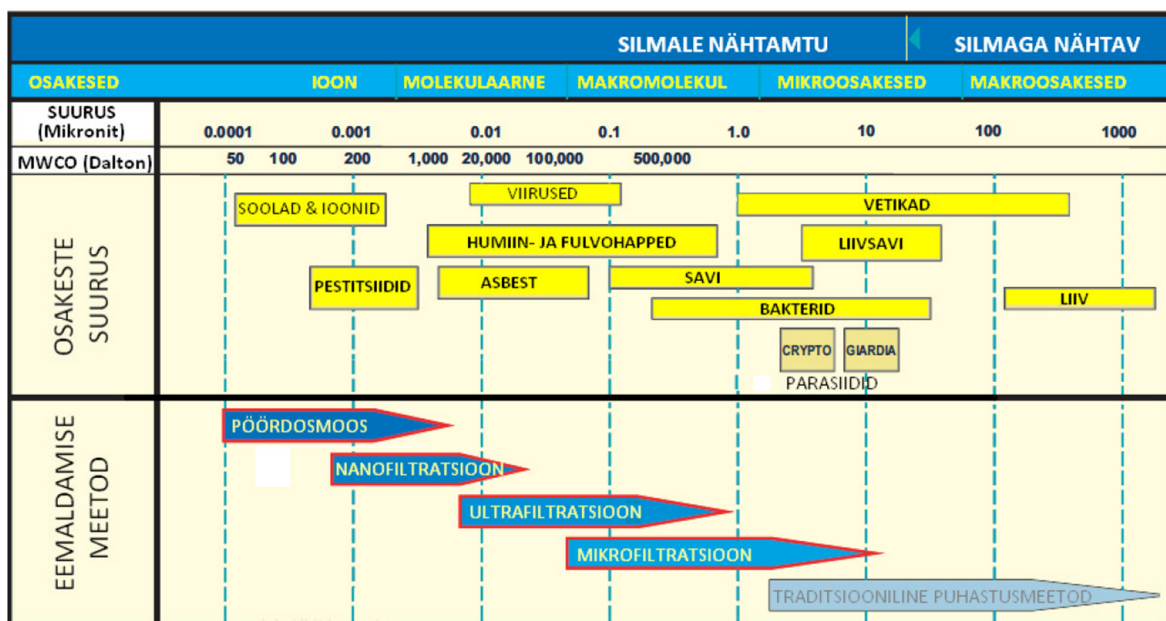
Teralistes filtrites ehk mahtfiltrites juhindub filtermaterjal is peatatav osake vedeliku voolujoonest, mistõttu järgnevate ilmingute tagajärjel võib vedelikus olev osake kinnituda filtermaterjalil: a) hõõrdumise tõttu; b) Browni liikumise tagajärjel; c) osakese inertsuse tagajärjel; c) gravitatsiooni tagajärjel. Sõltuvalt osakese suuruse suhtest pooriga, võib see olla võimeline liikuma läbi filtri ilma sinna kinni jäämata. (Ondeo-Degremont, 2002)

Osakeste kinnistumine filtermaterjalil on põhjustatud põhiliselt füüsikaliste jõudude (segunemine ja sidustumine) ja adsorptsiooni (Van der Waals'i jõud) poolt. Adsorptsioonist saab täpsemalt lugeda aktiivsöe filtri peatükis (vt peatükk 2.2.4). (Ondeo-Degremont, 2002)

Eespool nimetatud protsesside tulemusena vähenevad filtriavad juba kinnipeetud osakeste taha ummistumise tõttu. Filtri ava kitsenemise tõttu voolukiirus ja rõhk suureneb, mis avaldab suuremat koormust kinnipeetud osakestele, mistõttu järelejäänud osakesed võivad osaliselt eralduda ja sattuda sügavamale filtermaterjali või isegi välja kanduda filtraati. See tähendab, et filter suudab eemaldada suuremaid osakesi niikaua, kuni ei muutu osakeste

kuju. Tahked osakesed flokuleeruvad suuremaks või väiksemaks ning ei oma samu karakteristikuid ning seetõttu ei allu eelnevatele protsessidele. Vahetu vedeliku filtreerimine, koos peatatud tahkete osakestega säilitab vedeliku algse seisukorra ja elektrijuhtivuse. (Ondeo-Degremont, 2002)

Filtratsioon jaguneb vastavalt kinnipeetavate osakeste suurusetele kaheks: makroosakesed ja mikroosakesed (vt. joonis 3). Mikroosakestest peenemate osakeste eraldamiseks on tarvis kasutada membraantehnoloogiat. Levinuimat membraantehnoloogiat – pöördosmoosi – on kirjeldatud peatükis 2.6.



Joonis 3. Filtreerimise karakteristikud ja osakeste suurus (Urbanovitš, 2011)

Ummistumine on filtermaterjali pooride järk-järguline blokeerimine tahkete osade kogunemisel filtris, mis põhjustab rõhukao tõusu. Kui sissevoolul konstantne rõhk säilib, langeb filtri ummistumisel vooluhulk, et hoida väljajooksu rõhku konstantsena, ning algne rõhk peab kasvama kooskõlas ummistuse poolt tekitatava rõhukaoga. (Ondeo-Degremont, 2002)

Ummistumine sõltub: a) kinnipeetavast materjalist, b) filtratsiooni hulgast, c) filtermaterjali karakteristikutest (pooride suurus, osakeste ühtsus, karedus, materjali kuju). (Ondeo-Degremont, 2002)

2.2.2. Mehaaniline filter

Mehaanilise filtreerimise eesmärk on eemaldada veest eelkõige võõrised ja muud tahked osakesed, mis võivad põhjustada ummistusi ja seadmete amortiseerumist. Mehaaniline filter, tavaliselt sõel (*screening filter*), on teatud avasuurusega filterelement, kus avast väiksemad osakesed koos veega läbi pääsevad ja suuremad püütakse elemendi pinnal kinni ehk toimub mehaaniline eraldamise protsess. Mehaanilisi filtreid on erinevaid, filterelemendi ava suurused võivad ulatuda väga väikestest (nt 0,2 µm) kuni päris suurteni (nt 10 mm).

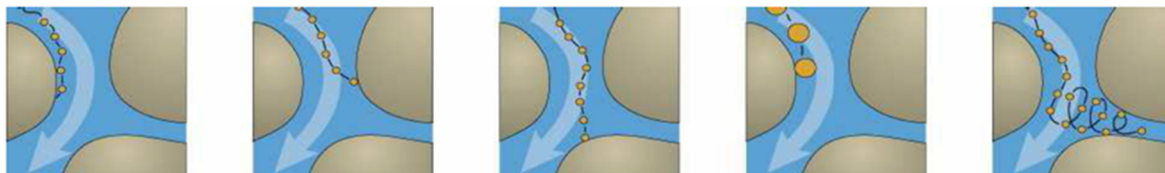
Mehaanilise filtri puhul on olulisteks määravateks teguriteks kinni püütavate osakeste suurus ja hulk vedelikus, sest nendest sõltub filterkeha pooride suurus ning filtri tüüp – väljavahetatav filterkeha või tagasipestav filter. Liiga väikesed filtri poorid põhjustavad liigset surveangu ja kiiret ummistumist ka liiga suur tahkete osakeste hulk põhjustab kiire ummistumise ja surveangu. (Ondeo-Degremont, 2002)

Mehaanilise filtri filtreerimis parameeter on defineeritud läbi võrgusilma tühimike: süsteem eemaldab kõik osakesed mis on suuremad kui võrgusilma suurus. Protsessi ajal filtreeritud osakesed võivad osaliselt takistada võrgusilma ja filter võib seetõttu eemaldada väiksemaid osakesi, kui on tegelik filtreerimis parameeter. (Ondeo-Degremont, 2002)

2.2.3. Liivafilter

Liivafilter kuulub teralise täitega filtrite hulka, mille filtrivaks materjaliks on teraline puistematerjali kiht. Liivafiltris toimub põhiliselt mahtfiltratsioon, mida kirjeldatakse filtreerimise protsesside peatükis. Enimkasutatav teraline filtermaterjal on kvartslüü, selle pärast nimetatakse neid tihti ka liivafiltritiks. Peale selle on kasutuses täitematerjalina antratsiit, aktiivsüsi (peatükk 2.2.4), Fe ja Mn suhtes selektiivsed materjalid (nt. *greensand*® ja *birm*®). Liivafilter koosneb üldiselt mitmest erineva fraktsiooniga liiva ja kruusa kihist. Filtreeriva kihi osakeste läbimõõt jääb üldiselt vahemikku 0,4-1,2 mm. Sellise fraktsiooniga osakesed moodustavad filterpadja (*filterbed*), kust vesi läbi voolab ja suuremad osakesed jäävad sinna kinni. Liivafilter ei eemalda mitte ainult suuremaid osakesi, kui liivaterade vahelised tühimikud, vaid ka väiksemaid osakesi. Liivafiltris võib filtreerimise põhjuseks

olla settimine, inertsus, hajuvus, katkestatud liikuvus ja turbulents (Teunissen, 2007). Joonisel 4 on toodud erinevate liikide illustreeritud osakeste liikumise põhimõtted.



Joonis 4. Vee ja osakeste läbivoolamine liivapadjast (Teunissen, 2007)

Kui liivaosakeste vahed hakkavad ummistuma, siis hakkab liivafilter tekitama suuremat vasturõhku ja see on märguandeks, et liivafilter vajab tagasipesu ehk läbiuhtumist. Liivafiltrit uhutakse filtreerimissuunale vastupidiselt ja nimetatakse tagasipesuks. Filtri läbipesu toime muutub liivakiht koredamaks ja selle maht võib suurenedagi isegi kuni 40 % (Bungay, 2006).

2.2.4. Aktiivsöe filter

Aktiivsöe kasutamist on kirjeldatud Egiptuses juba 1550 a.eKr, kui seda kasutati meditsiinilistel eesmärkidel, lõhna ja maitse eemaldamisel. Hiljem, 19. sajandil, kasutati aktiivsütt enamasti suhkrutööstuses värvi eemaldamise eesmärgil. 1930-ndatel kasutati esimest korda aktiivsütt veetööstustes aga seda ka ainult lõhna ja maitse eemaldamise eesmärgil. I maailmasõja ajal hakati aktiivsütt tootma tööstuslikult, sest tekkis vajadus gaasimaskide järele. Alles 1970-ndatel tõusis ühiskonnas huvi aktiivsöe, kui orgaaniliste ainete eemaldaja vastu. Seda põhjustas põhiliselt arenev põllumajandus ja tööstus, kus hakati kasutama hulgaliselt väetisi ja kemikaale mille kasutamisel ei pööratud suurt tähelepanu põhjavee kaitsele. Selle tagajärjel jõudis reostus põhjavee pealmistesse kihtidesse.

Aktiivsütt toodetakse kivisöest, turbast, puidust ja kookospähklist. Aktiivsüsi erineb oluliselt tavalisest söest, on poorne süsinikust materjal, mille kiud paiknevad ebaregulaarselt. Grafiidi kiuline struktuur võimaldab saavutada väga suure eripinna, mis annab sellele suurepärase omaduse adsorbeerida orgaanilisi ühendeid vedelikest ja gaasidest aktiivsöe pinnale vastavalt Van der Waals'i või London'i dispersioonijõu (hajuvuse) teooriale. Üks oluline

põhjus, miks aktiivsütt eelistatakse kasutada mitmesugustes protsessides, on selle tooraine enamasti looduslik päritolu. (Baquero & Bruggen, 2008)

Aktiivsöe tooraine ja struktuur

Aktiivsütt valmistatakse mitmel kujul – pulbristatud või teralise materjalina. Teraline aktiivsüsi on põhiliselt kasutusel joogivee töötlemisel. Seda pannakse täitematerjalina filtrisse, vesi puutub filtrit läbides kokku aktiivsöega, mis adsorbeerib vees leiduvad orgaanilised ühendid oma pinnale. Pulbristatud aktiivsütt kasutatakse täiesti teist moodi – seda segatakse vette, kus reoained adsorbeeritakse söekübemetele ning süsi eemaldatakse filtreerimise teel. Harvem valmistatakse aktiivsütt graanulitena, mis leiavad kasutust õhu puhastamisel. Graanulid võimaldavad õhul liikuda nende vahelt läbi ilma, et tekis suur survekadu ning süsi õhuvooluga kaasa lendleks. (Baquero & Bruggen, 2008)

Veetöötlemises kasutatava aktiivsöe tooraine kaks olulist kvaliteedikriteeriumit:

- a.) süsi ega söe tooraine ei tohi olla reostunud;
- b.) söe tooraine peab olema saadaval ühtlase kvaliteediga.

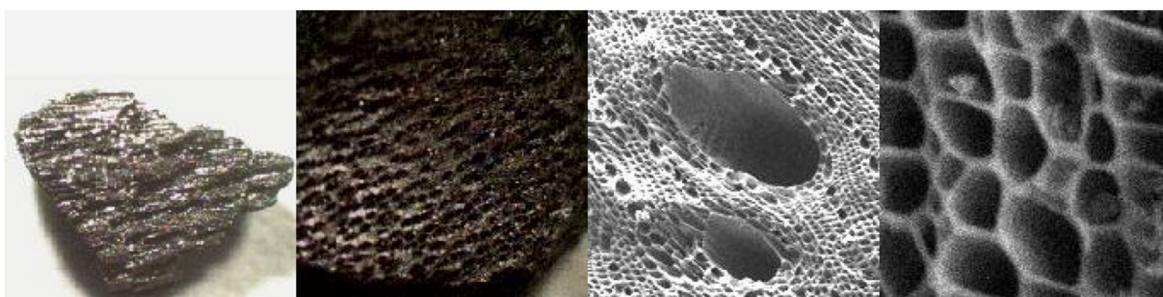
Söe tooraine peab olema reoainevaba, kuna pärast aktiveerimise (tootmis) protsessi võivad paljud reoained soovitava tulemuse rikkuda. On olemas mõningased reoained, mis tuleb kindlasti süsiniku tootmisel eemaldada. Aktiivsöe kõrvalistest komponentidest tuleb olla eriti tähelepanelik metallühendite suhtes, nende sattumine töödeldud vette põhjustab katalüütilisi reaksioone ning soodustab toksilist bioloogilist aktiivsust filterpadjas. Ühtlane söe kvaliteet on oluline säilitamiseks soovitavaid omadusi ning materjali pikaajalist tootlikkust ja vastu pidamist efektiivseks adsorptsiooni protsessiks. (Baquero & Bruggen, 2008)

Veetöötlemises kasutatavat aktiivsütt toodetakse tooraine endotermilise aktiveerimise abil, st süsinikku töödeldakse CO₂, õhu ja auru seguga temperatuuril 800-1000 °C. Termiline aktiveerimine küll vähendab adsorbendi osakeste suurust, kuid see-eest väline oksüdeerumine kui ka oksüdeeruv gaas levib hästi mitte aktiveerunud süsiniku osakeste sisemusse. (Baquero & Bruggen, 2008)

Süsiniku pooriavad on enamlevinult klassifitseeritud ja kirjeldatud järgnevalt (Baquero & Bruggen, 2008):

- 1) makropooride efektiivne raadius on suurem kui 500 nm, poorid avanevad süsiniku välimisel pinnal;
- 2) mesopooride raadius on 20-500 nm ning nad avanevad makropoorides;
- 3) mikropooride raadius on väiksem kui 20 nm ning nad avanevad mesopoorides.

Loetelu illustreerib joonis 5, kus teralise aktiivsöe pooride suurusaste kasvab vasakult-paremale.



Joonis 5. Lähivaade süsiniku pinnast (Baquero & Bruggen, 2008)

Makroskoopilist struktuuri aktiivsöes saab näha mikroskoobiga. Puust toodetud aktiivsöe süsinikul on väga ühtlane struktuur suurtest pooridest, mis on üksteisega paralleelsed. Kui võrrelda puidusüsiniku struktuuri kivisöesüsiniku struktuuriga, siis kivisöel on väga korrapäratu makropooride jaotus. Kookospähkli koortest toodetud aktiivsütt tuntakse kui mikroskoopse struktuuriga süsinikku, kuna selle enamus pooridest on mikroskoopsed. Puidupõhisel süsinikul on kõige võrdsem mikro-, meso- ja makropooride jaotus. Selline erinevus pooride struktuuri jaotuses mõjutab erineva suurusega molekulide jõudmist adsorptsiooni toimumise kohta süsiniku sisemuses. (Baquero & Bruggen, 2008)

Adsorptsioonil mõjutavad jõud ja protsess

Van der Waal'i ja Londoni hajuvuse jõud mõjutavad aatomeid, ioone ja molekule, kuid on suhteliselt nõrgad ning ulatub seetõttu mõjujõud ainult vastupidise laenguga lähestikku külgnevate aatomiteni. Molekulid lahuses ergutatakse ja seotakse adsorbendi poolt sorbeermise protsessi ajal tema pooridesse. Enamus molekulidest sorbeeritakse tänu

aktiivsöe suurele eripinnale selle pooride pinnale ning osalt ka adsorbendi välimisele pinnale. (Baquero & Bruggen, 2008)

Ülekandumine lahusest adsorbendi pinnale kestab kuni lahuse ja adsorbendi kontsentratsioonide tasakaal on saavutatud. Lahuse ülekanne peatub ning kontsentratsioonide vahe on mõõdetav ja defineeritav. Lahuse ja adsorbendi kontsentratsiooni tasakaalu jaotus on adsorptsiooni tähtis omadus aidates defineerida selle võimekust. See suhe määrab ära adsorptsioonis kinnipidamise aja/kiiruse ja on seega süsiniku sorbeerimis võime suurus. (Baquero & Bruggen, 2008)

On tähtis arvestada, et kui aktiivsöe adsorptsioonivõime ammendub, on kindlasti vaja aktiivsüsi välja vahetada uue vastu. Aktiivsütt on võimalik reaktiveerida, kui sorbeerunud molekulid süsiniku pinnalt desorptsiooni teel eemaldada. Aktiivsöe reaktiveerimine hõlmab termilist, füüsikalist ja bioloogilist töötlemist ning sarnaneb aktiivsöe esmasele aktiveerimisele. Reaktiveerimise käigus põletatakse osa süsiniku pinnast koos reoainemolekulidega ära. Veetöötluses ei tasul aktiivsöe kohapea reaktiveerimine ära, kui just aktiivsöe kasutamine ei ole tavapärasest tunduvalt suurem. (Baquero & Bruggen, 2008)

Reaktiveerimist ei tohi segamini ajada filtermaterjali tagasipesuga. Sel juhul uhutakse filtermaterjal perioodiliselt vastupidise veevooluga läbi, et eemaldada söe välispinna pooride avadesse kogunenud osakesed, lahustunud gaasidest tekkinud õhumullid ning kobestada filtermaterjali. Kui söe välispinna poorid ummistuvad, siis ei jõua reoained söe poorsesse sisemusse. Tagasipesul uhutakse reoained mehaaniliselt lahti ning juhitakse filtrist välja.

Filtermaterjali perioodiline kobestamine vähendab filtri töötamise tagajärjel filtermaterjali tihenemisest tekkinud survekadu. Tagasipesu käigus tõstetakse filtermaterjal lendlema, pesu lõppemisel materjal settib selektiivselt, st. suuremad terad langevad põhja ning peenemad jäävad filterpadja ülemisse ossa.

Aktiivsöe filtri tagasipesu on oluline ka siis, kui filter või filtermaterjal alles võetakse kasutusse. Uuest filtermaterjalist on vajalik enne kasutuselevõttu eemaldada aktiivsöe peenike osa (tuhk) ja õhumullid ning tagada materjali selektiivsus. Filtermaterjali tagasipesul on oluline arvestada uhtumiseks vajaliku materjali paisumisruumiga kui ka pärast pesu aktiivsöepadja tiheduse vähenemisega.

Aktiivsöe olulisemad parameetrid

Aktiivsütt iseloomustatakse füüsiliste ja toimeomaduste kaudu.

Füüsikalised omadused:

Terasuurus – Aktiivsöe terade suurus määratakse kindlaks sõelumise teel, saadud tulemus esitatakse sõelkõveral või söeterade protsentuaalse sisaldusega suuruse järgi. Söetera suurus, mille osakaal on kõige suurem, kirjeldab aktiivsöe terade üldist suurust.

Terade efektiivne suurus on aktiivsöe terasuurus, mille osakaal erineb 10 % teistest sõelmetest. See on tähtis parameeter erinevate omadustega aktiivsüte rakendamiseks erinevatel otstarvetel. Sellest sõltub filtermaterjalis tekkiv survevang, orgaaniliste ainete pooridesse sidumise võime ning see mõjutab adsorbeerimis võime kestvust.

Mehaanilised omadused:

Söeterade kõvadus – näitab aktiivsöe terade vastupanuvõimet mehaanilisele kulumisele.

Aktiivsöe tiheduse kirjeldamiseks on erinevaid viise. Aktiivsöe omakaal on olenevalt toormaterjalist erinev (puidul baseerual sõel on väiksem omakaal kui kivisõel).

Puistetihedus on tihedus, mis on saavutatud materjali puistamisel anumasse. Tihti nimetatakse seda ka pakketiheduseks. See on korratav ja lihtne mõõta ning on hea kvaliteedi kontrollimise/võrdlemise parameeter.

Tagasipestud ja drenitud söe tihedus on eriti tähtis parameeter joogivee töötlemisel. Pärast teralisele aktiivsöele tagasipesu ning enne töörežiimi taastumist põhjustab materjali kobestumine ja söekihi paisumise – umbes 15 % suureneb tagasipestud ja drenitud materjali tihedus võrreldes puistetihedusega. Tagasipestud ja drenitud söe tiheduse parameetrit kasutatakse söefiltri mahu dimensioneerimisel ja vaja mineva aktiivsöe kaalu määramisel, mis on vajalik veetöötluseks. (Baquero & Bruggen, 2008)

Tuhasisalduse osakaalu väljendatakse protsentides mineraalse osakeste kaalust. See näitab aktiivsöe puhtust.

Aktiivsuskarakteristikud on adsorptsioonivõime indikaatorid aktiivsöe potentsiaalsel reoainete eemaldamisel veest.

Joodiarvu abil on võimalik näidata mitu milligrammi joodi suudab üks gramm aktiivsütt adsorbeerida, kui joodi kontsentratsioon on 0,01 mol/l. See on enamlevinud parameeter mida kasutatakse aktiivsöe kirjeldamisel. Tänu joodimolekuli väiksusele iseloomustab see aktiivsöe mikropooride mahtu, väljendades seega võimet adsorbeerida väikesi molekule. (Baquero & Bruggen, 2008)

Joodiarv on aktiivsöe kvaliteedikontroll hea parameeter erinevate tootjate partiide võrdlemiseks. Ehkki kui vaadata seda praktikas, on see adsorbeerimise võimekust näitav parameeter kaheldav, kuna jood on väga lihtsalt adsorbeeruv ja seda viiakse läbi väga suurel kontsentratsioonil. Adsorbeeritud joodi hulk on palju suurem kui seda on praktikas adsorbeeritavad ühendid. Näites on kookospähkli koorel baseerual aktiivsöel kõrge joodiarv aga seda on võimalik rakendada praktikas üksikutel aladel. (Baquero & Bruggen, 2008)

Brunauer, Emmet ja Teller'i (BET) eripind on meetod aktiivsöe pooride pindala hindamiseks. BET eripindala ja joodi arvu vahel on korrelatsioon ning nende mõlema parameetrid on sarnased. See on vägagi teoreetiline meetod, mis koosneb hulgaliselt eeldustest, seega on selle tulemus üsnagi usaldamatu. (Baquero & Bruggen, 2008)

2.3. Vee aereerimine

Vett õhustatakse sellest gaaside eemaldamiseks (degaseerimine), vees lahustunud ainete oksüdeerimisel (raud, mangaan) kui ka lihtsalt vee rikastamiseks õhuhapnikuga. Eestis kasutatakse aereerimist laialdaselt põhjavees oleva raua- ja mangaaniärastamisel, vee süsihappegaasi sisalduse vähendamisel ning väävelvesinikust tingitud lõhna- ja maitseomaduste parandamisel. Teatud tulemusi võib saavutada ka vee stabiliseerimisel ja pehmemdamisel.

Õhuga aereerimise süsteemid kasutavad hapniku sisaldavat õhku ja toimivad vastavalt vee ja gaasi massiülekande seadusele. Aereerimissüsteemid projekteeritakse nii, et vee ja õhu vahel tekiks võimalikult suur kokkupuute pind massiülekandeks – vees tekitatakse võimalikult suur turbulents, et vesi ja õhk oma vahel võimalikult intensiivselt seguneks, võimalikult palju hapniku lahustuks vette ja vees olevad gaasid lenduks. (Droste, 1997)

Õhuga aereerimise saab õhutamise viisi järgi jagada järgnevalt:

- gravitatsioonieraatsioon;
- dušš-aeratsioon;
- õhu pihustamine vette.

Gravitatsioonieraatsioon

Neid süsteeme kasutatakse olmeveetöötlemisel. Gravitatsioonieraatoris kukutatakse vesi alla kahe tasandi või tasandite vahel. Kukkudes paiskub vesi piiskadeks ning puutub kokku õhuga, ka maandumisel vesi piisastub ning tekitab turbulentsi, mis soodustab õhu ja vee segunemist. Gravitatsioonieraatorite tüüpideks on kaskaadaeraator, reflektor-aeraator, voolamine läbi struktuurse materjali.

Dušš-aeratsioon

Vesi pihustatakse läbi jaotustorustikele paigaldatud düüside väikeste piiskadena õhku ning kogutakse kokku pihustite all olevas kogumismahutites. Dušš-aeratsioonil tekib võrdlemisi suur vee ja õhu kokkupuutepind. Dušš-aeratsiooni kasutatakse põhiliselt degaseerimisel ning raua- ja mangaani ärastamisel.

Õhu pihustamine vette

Õhu difusioon põhineb õhu või gaasi pihustamisel vedelikku. Õhu difusiooni süsteeme on vaba rõhulisi ja survelisi. Joogivee töötlemisel kasutatakse põhiliselt survelisi süsteeme, kuna neid on lihtsam automatiseerida ning nad võtavad vähem ruumi. Õhku võib lisada läbi düüsi otse aeratsiooni mahuti toorvee sissevoolu torru või läbi mahuti põhjas asetsevate difuursorite. Õhku lisatakse aeratsiooni mahuti põhjast vee vooluga samas suunas ning võetakse välja mahuti ülemisest otsast.

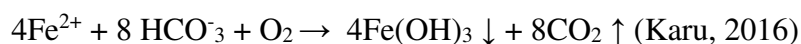
2.4. Raua- ja mangaaniärastus

Käesoleva töö peatükist 1.2 selgus, et nii lahustunud raua kui mangaani sisaldus on Eesti põhjavees suur. Raud esineb põhjavees tavaliselt lahustunud kujul Fe^{2+} -ioonina, olles

tasakaalustatud bikarbonaatidega HCO_3^- . Pinnavees on raud kas kompleksühendite koostises või peendisperse häguna $\text{Fe}(\text{OH})_3$. (Karu, 2016)

Suur rauasisaldus joogivees ei kujuta tervisele ohtu, kuid halvendab vee organoleptilisi omadusi, eelkõige võib kaasneda ebameeldiv maitse ja hägusus, vee kollakas värvus, san tehniliste seadmete määrdumine ning pruunika sademe teke torustikes. Tervisele on ohtlik juua vett, mille rauasisaldus on rohkem kui 6 mg/l (Terviseamet, 2017). Kõrge rauasisaldusega joogivesi võib põhjustada positiivset rauabilanssi ja oksüdatiivset stressi, mida peetakse mitmete haiguste, nagu põletikud, südame-veresoonkonna haigused, suhkurtõbi, kasvajakasv jms põhjustajaks. Rauarikas vesi on soodne keskkond rauabakteri arenguks, mille tagajärjel intensiivistub korrosioon ning võib toimuda torustiku järkjärguline kinnikasvamine korrosiooniproduktidega (Karu, 2016).

Fe^{2+} on võimeline vähelahustuvateks ühenditeks $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ja FeCO_3 seotuna välja sadenema kõrge pH korral – $\text{Fe}(\text{OH})_2$ -na pH > 10,3 ning FeCO_3 -na pH > 8,4 juures. Seetõttu toimub rauaärastus põhjaveest järgmise skeemi kohaselt – Fe^{2+} oksüdeeritakse õhuhapnikku või oksüdanti kasutades Fe^{3+} -ks, selle hüdrolüüsudes tekib vähelahustuv kolloidne $\text{Fe}(\text{OH})_3$, mis seejärel eemaldatakse veest puhastusseadmetes, põhiliselt filtrimise teel. $\text{Fe}(\text{II})$ oksüdeerimise enam kasutatav moodus on vee aereerimine. Aereerimisel toimub vee üheaegne rikastamine hapnikuga ning tekkiva süsihappegaasi eraldumine:



Mangaan esineb põhjavees sageli koos rauaga samuti lahustunud kujul kahevalentse ioonina Mn^{2+} . Mn oksüdeerub rauast aeglasemalt ja raskemini, moodustades hüdrolüüsudes vähelahustuvad $\text{Mn}(\text{OH})_3$ ja $\text{Mn}(\text{OH})_4$, mis põhjustavad mustade plekkide ja musta sademe teket, ka õlise kile tekkimist vee pinnale. Mn-ärastuse skeem on analoogne rauaärastusele, s.o oksüdatsioon sellele järgneva filtrimisega. Seejuures tuleb arvestada, et tavalise aereerimisega Mn enamasti ei oksüdeeru. Seetõttu on vajalik kas oksüdantide lisamine (KMnO_4 , O_3 , ClO_2) või (ja) rõhkaeratsioon gradiiris. Sageli on Mn ühendite filtrimisel hädavajalik kasutada Mn suhtes selektiivseid filtrimaterjale, mis võib tähendada eraldi filtreid Fe ja Mn tarbeks. (Karu, 2016)

Lihtaeratsioon annab tulemusi, kui Fe ei ole vees üle 10 mg/l, H_2S < 0,5 mg/l, kui see esineb vees põhiliselt Fe^{2+} -ioonina ning on kergesti oksüdeeruv. Kasutatakse lihtsamaid mooduseid

vee aereerimiseks enne selle filtrimist. Vesi piserdatakse filtrisse kas 0,5-0,6 m kõrguselt veepeegli pinnast või survefiltrite korral pumbatakse kompressoriga õhku filtri pealevoolutorustikku. Õhku on vaja juurde pumbata ligikaudu arvestusega 2 l õhku 1 g Fe^{2+} kohta. Lihtaeratsiooni korral on rauaärastusfiltri töös „tavalise selitusfiltriga“ võrreldes eripära, mis väljendub selles, et filtri efektiivseks tööks on vajalik $\text{Fe}(\text{OH})_3$ katalüütilise kile tekkimine täitematerjali terade ümber. Kile kiirendab oksüdatsiooniprotsessi ja soodustab rauaühendite adhesiooni terade pinnale. Kile tekitamist nimetatakse filtri laadimiseks ja see võib võtta aega 30-40 tunnist paari ööpäevani. Katalüütilise kile tekkimine võimaldab lihtaeratsiooni korral loobuda vee põhjalikust aereerimisest. (Karu, 2016)

Kui lihtaeratsioon siiski soovitud tulemusi ei anna, kasutatakse rõhk-aeratsiooni. Rõhk-aeratsioonis rauarikas toorvesi juhitakse filtrisse läbi gradiiri. Sageli on sel juhul gradiiri ja filtri vahel kontaktreservuaar, kus toimub Fe^{2+} lõplik oksüdatsioon, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ teke ning osaline väljasadenemine. Rõhk-aeratsiooni kasutatakse sageli ka juhul, kui on vajalik samaaegne Fe ja Mn ärastus, mis eeldab eraldi filtreid raua ja mangaani ärastamiseks. Vett võib sel juhul puhastada näiteks konteinerpuhastites. (Karu, 2016)

2.5. Vee pehmendamine

Suurem osa vees lahustuvaid ained on omadustelt elektrolüüdid, st. veekeskkonnas nad dissotseeruvad elektrilist laengut kandvateks ioonideks, aatomiteks või aatomite gruppideks. Elektrolüüdi molekul laguneb kaheks iooniks. Üks neist kannab positiivset laengut, seda nimetatakse katiooniks ja märgistatakse „+“ märgiga; teine kannab negatiivset laengut, ning seda nimetatakse aniooniks ja märgistatakse „-“, märgiga. Elektrolüüdi koosseisu kuuluvad metallid Mg, Ca, Fe on katioonid, aga metalloidid, nt kloor (Cl) ja väävel (S) – anioonid. Sealjuures vesi, kui elektrolüüt on alati elektriliselt neutraalsete omadustega, kuna positiivselt laetud ioonide – katioonide kogus on alati võrdne negatiivselt laetud ioonide – anioonide kogusega. (Zimmermann & Pöldsepp, 2002)

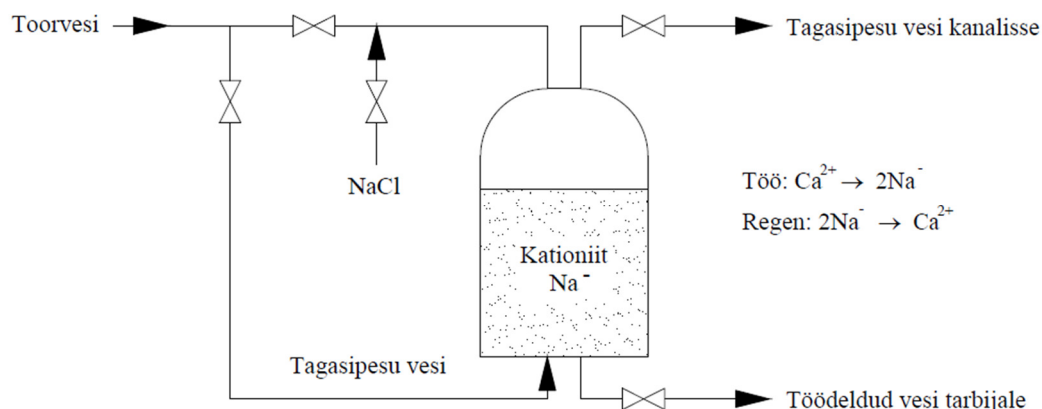
Vee suur karedus on ebasoovitav eelkõige tootmisveevarustuses (soojavee-süsteemid, aurukatelde toitevesi, vesijahutus jm), kui vee käitlusega kaasneb vee temperatuuri tõus. Selle tagajärjel toimub karedussoolade sadenemine ning tekib katlakivi. Karedus on

probleemiks ka vee kasutamisel majapidamises (näiteks kohviautomaadid, aurutriikraud, mullivannid ja aurusaunad). Majapidamis tehnika ja vannitoa furnituur on kallid ja selle kaitsmine õigustab vee pehmemendamiseks tehtud kulutusi. Tervisele kare vesi kahjulik ei ole, pigem on kahjulik ülemäärane pehme vee kestev tarbimine. (Karu, 2016)

Tööstusseadmete sh. küttesüsteemide töökindlus ning nende ökonoomsus sõltub suurel määral toitevee omadustest, milles on vee karedusel suur roll. Ioonvahetid rajatakse veepehmemendamise eesmärgil vees lahustunud ioniseeritud saasteainete kõrvaldamiseks. Viimasel ajal kasutatakse veepehmemendeid elamutes tarbevee pehmemendamiseks, et vältida kodutehnika kiiret amortiseerumist katlakivi tekke tagajärjel. Sellisel otstarbel veepehmemendite kasutamine tarbevee täiendaval töötlemisel on levinud enamjaolt põhjavee toitelistes veevõrkudes kus on probleeme liigse karedusega, seljuhul kasutatakse veepehmemendusseadmes toidutööstuseks sobilikke kationiite, kuna töödeldud vett kasutatakse joogiveena ja toiduvalmistamisel.

Veepehmemendi tööprotsess

Veepehmemendusseadmes voolab kare vesi (toorvesi) läbi ioonvahetusvaigu (kationiit), mis on paigutatud survemahutisse. Mahutil on ülemine ja alumine jaotustorustik ning kogumissüsteem – nende eesmärk on tagada vee ühtlane vool läbi ioonvahetusmaterjali. Kui vesi läbib vaiku, siis karedust tekitavad ioonid (Ca ja Mg ioonid) vahetuvad vaigu pinnal Na-ioonidega. See selgitab ka töödeldud pehme vee mõneti kõrgemat naatriumioonide sisaldust ja elektrijuhtivust. Kui ioonvahetusvaik on ammendunud, siis seda regenereeritakse soolalahusega. Veepehmemendamise protsessi kirjeldab Joonis 6. (Purolite, 2012)



Joonis 6. Veepehmemendi tööprotsess

Ioonvahetusvaigu regenereerimiseks loputatakse see reagendiga (soolalahusega) läbi, et anda vaigule tagasi eraldunud Na-ioonid. Enamlevinud regenereerimismeetod on vastuvoolu regenereerimine, mis jaguneb omakorda viide tsükklisse ja enamasti võtab see olenevalt seadme seadistusest aega 1-2 tundi. Sellist tüüpi läbipesuks on ühisveevärgist seadmesse sisenev toorvesi piisava kvaliteediga kõikideks tsükliteks, muudel puhkudel tuleb veenduda seadmesse siseneva toorvee tootjapoolt määratud kvaliteedis. Tagasi pesu võib teha ka pehmendatud veega, mis parandab regenereerimise tulemust, kuid arvestada tuleb täiendavate kulutustega puhta vee mahutile ja veekulu suurenemisele. (Purolite, 2012)

Päriivoolu tüüpi läbipesu tsüklid on:

- 1. tsükkel e. tagasipesu – Vesi siseneb agregaat läbi alumise jaoturi ajades vaigu kohevile, selle eesmärk on suurendada reagenti kontaktpinda ja eemaldada vaigu terade vahele settinud osakesed, mis on tulnud kaasa toorveega.
- 2. tsükkel e. ioonvahetusmaterjali settimine – Pärast tagasipesutsükli peab materjal tagasi settima, et saada tagasi ioonvahetusmaterjali staatiline kuju enne reagenti sissevoolu (järgmist tsükli).
- 3. tsükkel e. reagenti sissevool – Reagenti sissevoolu kiirus ja lahuse kontsentratsioon peavad olema väga täpsed. Hea kontakt NaCl lahuse ja vaigu vahel on oluline optimaalseks tööks. On soovitatav kasutada 10 % soolalahust ning manustada kiirusega 2-4 ioonvahetusvaigu mahu jagu vett tunnis.
- 4. tsükkel e. aeglane loputus – Loputusvee sissevool toimub reagenti lisamisega samal kiirusel so. 2-4 ioonvahetusvaigu mahu jagu vett tunnis. See tagab ühtlase kontaktaja vaigu ja reagenti vahel ning loputusvesi järgib reagenti liikumise teekonda ioonvahetusmaterjali vahel.
- 5. tsükkel e kiire loputus – ioonvahetusvaik pestakse läbi suurel voolukiirusel – sageli sarnaneb see töötsükliks olevale voolukiirusele. Kiire loputuse käigus eemaldatakse viimased soolalahuse jäägid ning tagatakse seadme valmisolek uueks töötsükliks. (Purolite, 2012)

Regeneratsioon algatatakse käsitsi või automaatselt läbi kontrolleri. Automaatseks regeneratsiooniks on vaja varustada kontrolleri veearvestiga või taimeriga pärast mille seatud vahemikku alustab seade läbipesu tsükli.

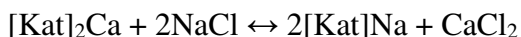
Kationiit

Kationiidid on teralised ioonivahetusmaterjalid – kõrgmolekulaarsed ühendid, mis koosnevad lahustumatust skeletist (ühevalentne anioon, tähistatakse [Kat]) ja selle külge kationiidi laadimise käigus sorbeerunud vahetusioonidest – katioonidest. (Karu, 2016)

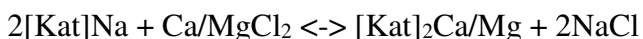
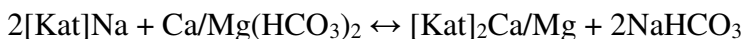
Ioonivahetusvõime on nii looduslikel kui sünteetilistel, nii orgaanilist kui mineraalset päritolu materjalidel – turbal, pruunsöel, glaukoniitliival jt. Enamasti kasutatakse tänapäeval siiski sünteetilisi orgaanilisi materjale – sulfosütti ja sünteetilisi vaike. Sulfosüti kujutab endast tumedat värvi graanuleid, mis saadakse kivisöe termo-keemilisel töötlemisel happega, sünteetilised vaigud on heledat värvi õlise läikega graanulid. (Karu, 2016)

Kasutatakse ühe- ja kaheastmelist skeemi sõltuvalt nõutavast jääkkaredusest. Esimesel juhul saadav vee jääkkaredus ei ületa enamasti 1 mg-ekv/l, teisel juhul võib saada tulemuse kuni 0,01 mg-ekv/l. (Karu, 2016)

Kationiidi laadimisel:



Kationeerimisel:



Seega Na-kationeerimisel vee leelisus (HCO_3) ei muutu, soolsus mõnevõrra aga suureneb (ühe Ca-iooni vastu leostub vette kaks Na-iooni). (Karu, 2016)

Olulised parameetrid

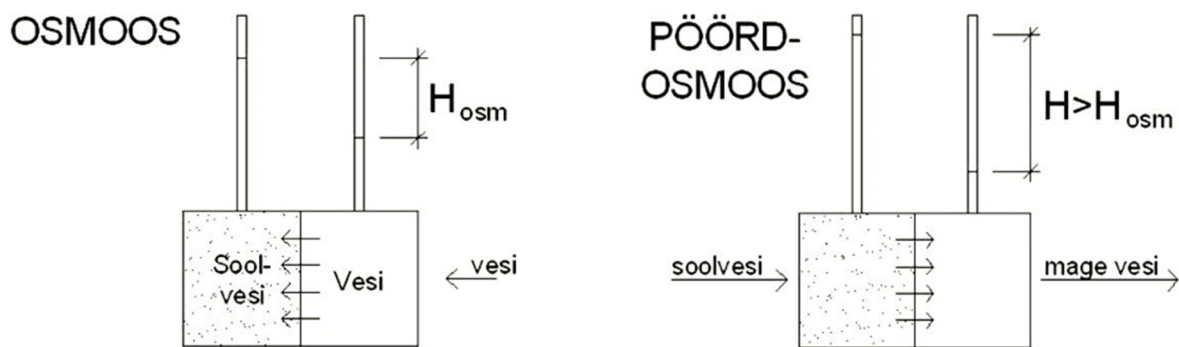
Veepehmendamisel tasub silmas pidada järgmisi tähtsamaid tehnilisi parameetreid:

- Kationiidi tüüp – näitab mis tüüpi ionidega on ioonvahetusvaik laetud. Enamlevinult kasutatakse veepehmendamisel Na-ioonset vaiku, kuid kasutusel on ka H-ioonset ioonvahetusvaiku.

- Ioonvahetus võime (eq/l) – tootja väljendab selle näitaja abil kationiidi ioonvahetusvõimekust ekvivalentides materjali mahu kohta. See on kationiidi tähtsaim näitaja, mille põhjal dimensioneeritakse vajaminev ioonvahetusmaterjali kogus.
- Terasuuruste vahemik (μm) – kirjeldatakse vaigu terasuuruste vahemikku. See on tähtis parameeter kationiidi rakenduste valikul.
- Puistetihedus (g/l) - on tihedus, mis on saavutatud materjali puistamisel anumasse. See on oluline parameeter seadme dimensioneerimisel.
- Temperatuuripiirang ($^{\circ}\text{C}$) – määrab kationiidi abil töödeldava vee maksimaalse temperatuuri.
- Hüdrauliline koormus (*bed volume per hour* BV/h) – ioonvahetit läbiva materjaliga võrdne vee kogus tunnis. Kationiidi hüdrauliline koormus töötsükli peab jääma vahemikku 8-40 BV/h (Purolite, 2012).

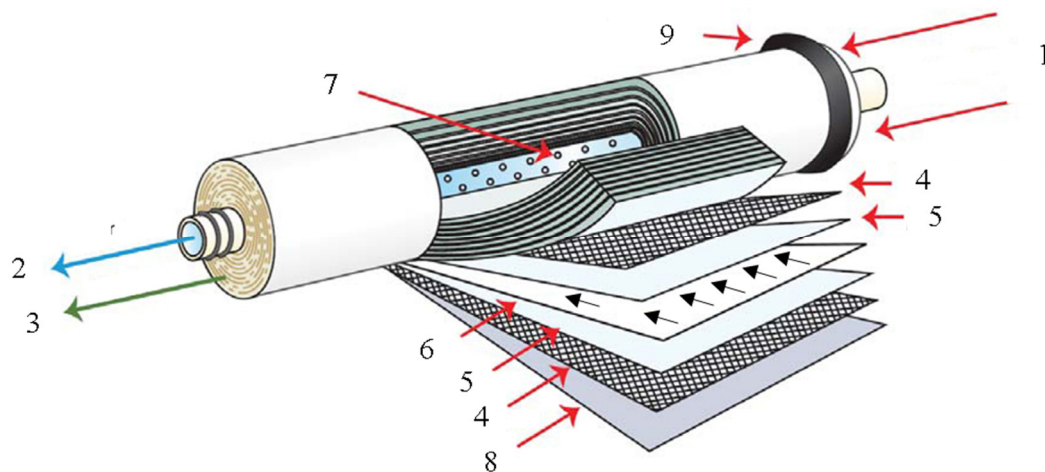
2.6. Pöördosmoos

Pöördosmoos (PO) on membraantehnoloogia hulka kuuluv füüsikaline protsess, mis on neist kõige väiksema poorisuurusega – 0,0001 μm . Tegemist on loodusliku osmoosi pöördprotsessiga, kus avaldatakse hüdrostaatilist rõhku kõrgema kontsentratsiooniga lahusele, mille tulemusena lahusti liigub madalama kontsentratsiooniga lahusesse, kuid reoained peetakse membraanil kinni (vt. joonis 7). PO kasutatakse põhiliselt veest soolaärastamisel (nt. merevee magestamine) ja desinfitseerimisel. Eestis levinult paigaldatakse PO seadmeid ühisveevärkidesse kus leidub vees liigset fluoriidi. Meetod on soositav, kuna protsessis ei kasutata kemikaale, membraani eluiga on suhteliselt pikk ning protsess toimib laias pH vahemikus. Meetodi halvim külge on seadme hind ning asjaolu, et veest eemaldatakse kõik, kaasa arvatud inimorganismile vajalikud mineraalid.



Joonis 7. Osmoosi ja pöördosmoosi illustreeriv skeem (Karu, 2016)

PO seadmetena on levinuimad spiraalsete moodulitega ehitatud ning torusse paigutatud membraanpaketid (vt. joonis 8). Spiraalse mooduli moodustavad selle keskel asuv perforeeritud toru (7) ning toru ümber rullitud erinevatest kihtidest koosnev pakett, mille kolm külge on hermeetiliselt suletud, neljas aga ühendatud perforeeritud touga. Paketis on vahekiht (4), kuhu mooduli otsast juhatakse toorvesi (1), poolläbilaskev membraan (5) ning permeaadi (e puhastatud vee) kogumiskollektor (6), kust permeaat (2) perforeeritud torusse juhatakse.



Joonis 8. Spiraalse pöördosmoosimooduli skeem: 1 - toorvee sissevool, 2 - permeaadi äravool, 3 - kontsentraadi äravool, 4 - vahekiht, 5 - poolläbipaistev membraan, 6 - permeaadi kogumiskollektor, 7 - perforeeritud toru, 8 - kate, 9 - tihend (Grozine, 2014)

Protsessi võib nimetada ka ristvoolufiltrimiseks – üle poorse membraani juhatakse toorvesi, avaldatakse sellele survet, puhastatud vesi (permeaat) läheb läbi membraani, aga soolane (ka muu lahustunud aine) kontsentraat tõrjutakse ja juhatakse välja. Rusikareegli järgi on kontsentraadi ja permeaadi suhe 60:40.

2.7. Desinfitseerimine

Enamus mikroorganismidest peetakse kinni veepuhastusseadmetes. Järelejäänute hulgas võib olla ka tõvestavaid organisme, nende hävitamiseks on vaja rakendada spetsiaalseid veetöötlusprotsesse. Seega nimetatakse vee desinfitseerimiseks vees olevate mikroobide, sh tõvestavate mikroobide hävitamist (EVS-847-2-2016, 2016).

Tallinna ja Narva pinnaveest võetud joogivesi peab olema enne tarbijale toimetamist olema desinfitseeritud. Põhjavee toitelistes ühisveevärkides on see nõutav ainult vajadusel.

Desinfitseerimisel kasutatavad põhilised protsessid on vee töötlemine tugevatoimeliste oksüdantidega (kloori ja kloori sisaldavate reagentide või osooni lisamine) ja kiiritamine ultraviolettkiirtega. Tulemusi annavad ka membraanprotsessid (ultra-filtratsioon). Väiksemate veekoguste desinfitseerimisel võib vajaliku efekti saavutada ka kaaliumpermanganaadi, joodi, vesinikülhappendi lisamisega, vee keetmisega, klooriühendeid sisaldavate tablettide lisamisega. (Karu, 2016)

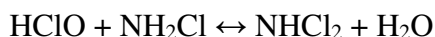
Kloorimine

Kloor on vee desinfitseerimiseks kasutatav levinuim oksüdant. Selle põhjuseks on kloori stabiilne efektiivsus, võimalus jääkkloori kaudu määrata nii vajalik klooriannus kui ka kontrollida desinfitseerimisprotsessi kulgu, samuti kloorilahuse ettevalmistamiseks ja annustamiseks kasutatava aparatuuri suhteline lihtsus. (Karu, 2016)

Kloor (Cl_2) esineb looduses gaasi või vedeliku kujul. Gaasina on klooril rohekaskollane värvus ja tugev ärritav lõhn. Kloori saab madalatel temperatuuridel vedeldada (transportimiseks). Vedeliku vabanemisel muutub see kiiresti gaasiks tagasi. Kloor lahustub vees väga hästi ja moodustab lahustamisel tugevaid happeid. Kloori kasutatavates

veetöötlusjaamades on kloori hoiustamisele esitatud karmid nõuded, kuna kloor on mürgine ning võib olla plahvatusohtlik.

Cl₂ lisamisel vette toimub selle hüdrolüüs, tekib hüpokloorishape HClO, mis omakorda dissotseerudes moodustab hüpokloritiooni ClO⁻ (Karu, 2016):



Kloorimisel on esmatähtis optimaalse klooriannuse määramine. Seejuures lähtutakse jääkkloori sisaldusest, mis on kindlaks määratud joogivee normide ja standarditega. Jääkkloor on vajalik desinfitseerimise sanitaarse garantii tagamiseks ning optimaalseks klooriannuseks loetakse sellist annust, mis teatud kontaktaja pärast tagab vees normatiivse jääkkloorisisalduse. Eestis kehtivate nõuete järgi on selliseks kontaktiajaks 30 min ning nõutav jääkkloori sisaldus on 0,2...0,5 mg/l. (Karu, 2016)

UV-kiirgus

See meetod seisneb vajaliku UV-kiirguse annuse emiteerimises töödeldavas vee erinevatele mikroorganismidele. Maksimaalne mikroorganismide adsorptsiooniefekt saavutatakse lainepikkusel 260 nm. Desinfitseerimiseks sobiv UV-C-kiirguse lainepikkuse vahemik on 245 nm kuni 285 nm. Ultravioletenergia lõhustab eri orgaanilisi komponente mikroorganismide rakkudes, põhjustades bioloogilisi muutusi nende geneetilises materjalis, mistõttu mikroorganismid muutuvad arenemis- ja paljunemisevõimetuteks. Tagamaks desinfektsiooni efektiivsust, peavad UV-kiired sattuma kontakti iga mikroorganismiga. (EVS-847-2-2016, 2016)

UV-seadme põhilüli on valgusallikas, milleks tüüpiliselt on gaaslahendus-, madalrõhu-, elavhõbelambid või tänapäevased säästlikud LED-lambid. Juhtides valgusallikast läbi elektrivoolu, muundub elektrienergia optilise kiirguse energiaks. Selle hulgas on ka silmale nähtamatu ultraviolettkiirgus. Ultraviolettkiirguse desinfitseeriv efekt on seotud kiirguse fotokeemilise toimega mikroorganismi raku-molekulidele. Valgusallikas paigutatakse kvartsümbrisse vältimaks lambi vahetut kokkupuudet veega ning asetatakse kiirituskambrisse, millest desinfitseeritav vesi läbi voolab. (Karu, 2016)

UV-seadmele annab eelised tema kompaktsus, see ei vaja reagente, desinfitseerimine toimub momentaanselt (puudub vajadus kontaktbasseini järele), puudub mõju vee lõhnale ja maitsele, lihtne ja kiire käivitamine ning töö juhtimine on hästi automatiseeritav.

UV-seadme põhiprobleem on järelmõju puudumine desinfitseeritud veele, ka on raske kontrollida desinfitseerimise tegelikku tõhusust ning lahustumata lisandite olemasolu vees (hägusus, värvus) vähendab oluliselt seadme efektiivsust.

3. ÕPPESTEND

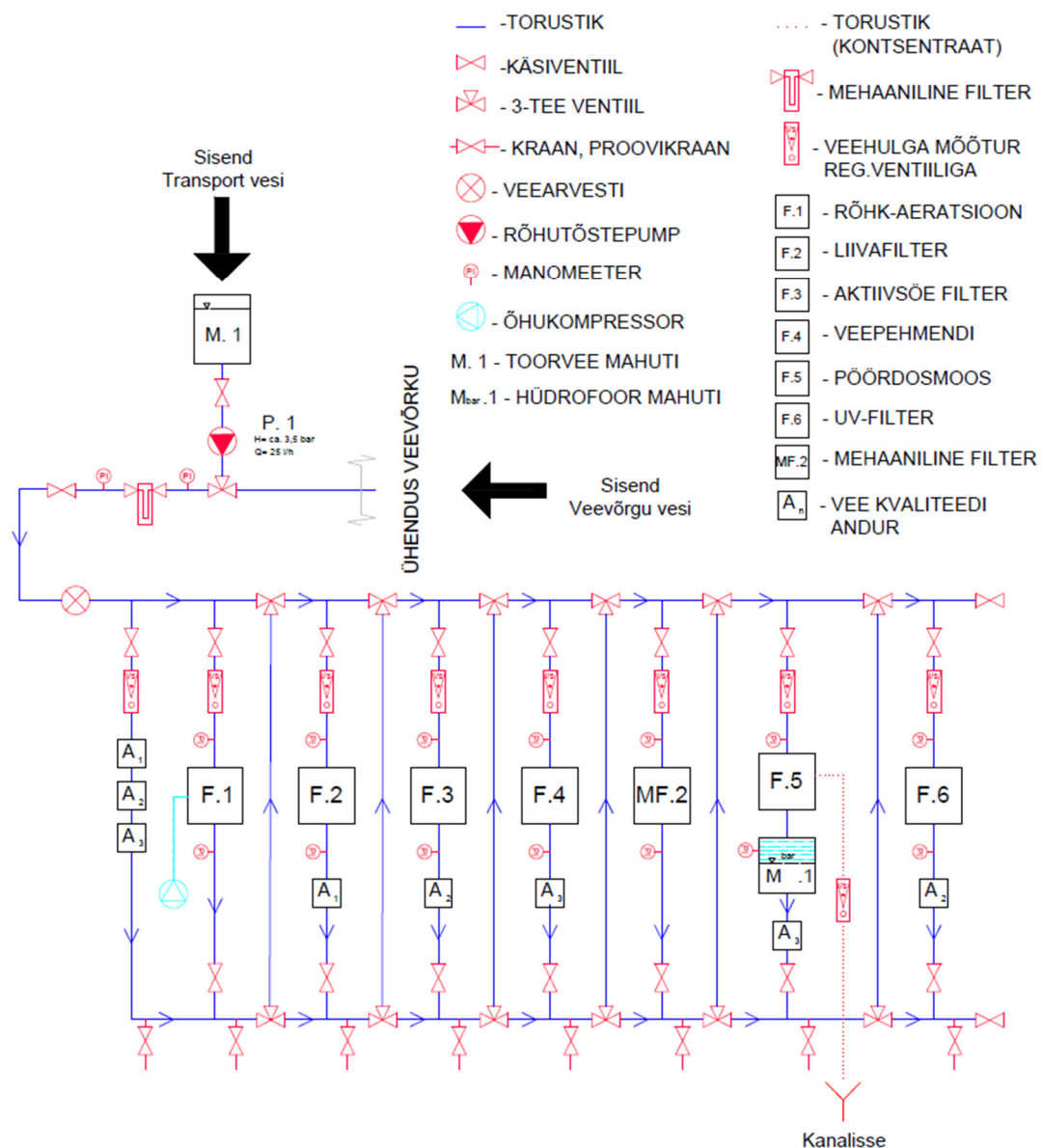
3.1. Eesmärk

Magistritöö eesmärgiks on projekteerida ja ehitada välja stend, kuhu on kompaktselt koondatud kõik peamised, peatükis 2 kirjeldatud olmevee töötlemises enimkasutatavad seadmed ja agregaadid. Õppestend monteeritakse roostevabast terasest ratastel raamile, mis on lihtsasti teisaldatav. Stendi on võimalik kasutada vee-eriala tutvustamiseks ning transportida õpilasmessidele, üldhariduskoolidesse ja gümnaasiumitesse, veepäevadele ja näitustele. Stend töötab nii ühisveevärgi veel kui ka mujalt toodaval veel, mis tagab paindliku töö. Stendi peamine eesmärk on demonstreerida, et vee omadusi on võimalik väga suurtes piirides muuta, kohandades seda tarbija vajadustele vastavaks. Stendi valmimise tulemusel on järgmistel tudengitel õppeprotsessis võimalik tutvuda veetöötlustehnoloogiatega arendades sellega veepuhastus valdkonna teadmisi ning katsetada ja analüüsida vee omaduste muutust.

3.2. Projekteerimine

Õppestendi projekteerimise töö käik jagunes viide etappi. Esimeses etapis tutvus töö autor EMÜ veemajandus osakonna vajaduste ja puudustega laborites, vesteldes õppejõududega, kaardistades senise ekspluatatsiooni käigus tekkinud probleeme ning püstitades võimalikke lahendeid. Kindlasti mängis selles etapis suurt rolli töö autori enda kogemus vesiehitus ja veekaitse eriala õppeprotsessi läbimisel. Teises etapis asus töö autor 2016. a suvel praktikale veetöötlusettevõttesse Miridon OÜ, et tutvuda ettevõtte poolt pakutavate veetöötlusseadmetega, omandada teadmisi veetöötlustehnoloogiast, saada praktiline ettekujutus vee kvaliteedi probleemidest ning praktiseerida lukksepa oskusi, mida hiljem ära

kasutada õppestendi ehitamisel. Praktika andis autorile ettekujutuse kasutatavatest veetöötlustehnoloogiatest, nende rakendamise võimalustest ning ülevaate veetöötlusel kasutatavatest materjalidest ja fittingutest. Kolmandas etapis loodi õppestendi visioon, määrates õppestendi rakendused (tabel 2), eesmärk ja eeldatavad mõõtmed, mille ajendil teostati protsessi skeem (vt. joonis 9). Neljandas etapis loodi koostöö veetöötlus ettevõttega Miridon OÜ, konsulteerimaks projekti realiseerimis võimalusi ning täpsustamaks materjalide valikut. Viiendas etapis teostati tehnoloogiline skeem (vt. lisa 1) ja dimensioneerimine, mille põhjal koostati spetsifikatsioon (vt. lisa 2) ning telliti ehitamiseks materjalid.



Joonis 9. Stendi põhimõtteskeem (veebruar 2017)

Joonisel 9 on kujutatud veetöötlustehnoloogiad (F.1-F.6, täpsustusi vaata tabelist 2), ühendustorustik, torustiku reguleerimisarmatuur, toitevee allikad; rõhutõsteseade; proovivõtukohad ning vee kvaliteedi monitoorimise lisaseadmed (veearvesti, vooluhulga mõõturid, manomeetrid ja andurid).

Joonis 9 kujutatud esmase stendi skeemi, alusel hakati otsima õppestendi jaoks sobilikke tehnoloogilisi lahendusi ja ehitusmaterjale. Veetöötlustehnoloogiate valiku olulisemateks lähtepunktideks olid mõõdud ning ehitusmaterjal – neid peab olema võimalik eksponeerida läbipaistvana, st läbipaistvas korpusas asuva filtri, sõela või muu seadme sisu ja protsess peavad olema nähtavad. Mõõtude puhul lähtuti esmalt euroalusele sarnase põrandapinna ära kasutamisest ning et olulised seadmed oleksid inimese silmade kõrgusel.

Õppestendi tehnoloogilise skeemi (vt. lisa 1) koostamisel lähtuti põhimõttest, et oleks tagatud veetöötlusmeetodite järjestikune või ristikasutus, luues võimaluse rakendada filtreid üksikult, jadamisi (vt. lisa 3. ja 4), rööbiti (vt. lisa 5 ja 6), tehnoloogiliste paaridena (näiteks aeraatsioon ja liivafilter ning mehaaniline filter (5 µm) ja PO) (vt. lisa 7) ning võimaldades erinevalt töödeldud vee segunemist väljavoolukollektoris. Skeemi tagumisse otsa nähti ette lisafiltri või -seadme ühendamise võimalus, et tulevikus oleks võimalik õppestendil katsetada valikust välja jäänud veetöötlustehnoloogiaid (nt. elektrodeioniseerimine (EDI), osoonimine jne). Skeem pidi tagama filtritesse siseneva vooluhulga ja koguse jälgimise, rõhulangu tuvastamise filtris ning võimaldama proovivõtmist toorveest ja iga filtri tagant. Skeemi veega varustamine lahendati kahe võimalusega – veevõrgu ja mahutite toitet. Veevõrgu surve (2,5-5 bar) piisab, et kaitada kõiki filtreid peale pöördosmoosi – selleks nähti PO'le ette eraldi rõhutõstepump. Mahutitelt toitmiseks paigaldati teine pump kohe mahutite kõrvale. Pumba valikut kirjeldab käesoleva peatüki pumba valiku lõik. Skeemis tuli ette näha ka vee kanaliseerimine ja stendi veest tühjendamine ka siis, kui puudub juurdepääs ühiskanalisatsioonile. Proovivõtu vesi kogutakse renni, mis juhatakse läbi trapi otse kanalisse või selle puudumisel kaasaskantavasse mahutisse. Stend tühjendatakse veest läbi proovivõtu kraanide, kuna need asuvad filtritest madalamal.

Rotameetrite ja veearvesti ülesanne on määrata filtrit läbiva vee vooluhulk (rotameeter) ja kogus (veearvesti). Rotameetritega koos paigaldatakse reguleeriviid, mille abil vooluhulka reguleerida, selline kooslus annab võimaluse näha vooluhulga muutumist oma silmaga. Vooluhulk ja selle reguleerimise võimalus on oluline, kuna filtreerimise tulemus sõltub sellest suuresti. Vee koguse määramine on tähtis, sest nt aktiivsõe filtri ja

veepehmenemise täitematerjali veetöötlemise võimekus ammendub pärast teatud hulka töödeldud vett, ka on töödeldud veekogus saadud toodangu koguse kirjeldamiseks. Ruumi kokkuhoiu mõttes veearvestit iga filtri kohta ei paigaldatud – paigaldati üks, vee sisendisse. Selle negatiivseks küljeks on, et skeemi rööbiti rakendamisel ei anna see tagasisidet üksikust filtrist läbinud veekoguse kohta vaid kogu tarbitud veekoguse kohta – jadamisi või üksikult filtrit rakendades küll. Rotameetrid arvestati see-eest iga filtri kohta üks, vooluhulga põhjal saab aega võttes veekogust arvutada, on väiksem ja mitmekülgsem. Filtrite dimensioneerimisel sai selgeks, et rotameetrid ja veearvesti peavad töötama tavapärasest väiksemal vooluhulgal, seega tuli arvestada nende kitsa valikuga ja pikkade tarneaegadega.

Skeemi koostamisel jõuti järeldusele, et reaalajas andurite vee koostise teada saamine on stendi ekspluatatsiooni arvestades tülikas, lisaks andurite suurele maksumusele vajavad need pidevat hooldust ja kalibreerimist, seega jäeti andurid skeemist välja. Vee kvaliteedi monitoorimine hakkab toimuma kiir-testerite abil. Ruumi kokkuhoiu mõttes jäeti välja ka teraliste filtrite tagasipesu võimalus, kuna filtri dimensioneerimisel oleks pidanud siis arvestama filterpadja paisumisega tagasipesu tsüklis, mis oleks olnud olenevalt filtermaterjalist 30-50 % ning reagenti doseerimisega. Küll, aga on loodud selleks valmidus filtreid läbiva tagasipesu vee kanaliseerimise näol, sest ka filtrite täitmisel veega on vajalik õhk välja juhtida. Selleks, et tagasipesu juurde ehitada on vaja vähendada filterpadja kihti, luua vastupidine veevoolu liikumine ja vajadusel reagenti doseerimine.

Veetöötlustehnoloogiate valik ja seadmete dimensioneerimine

Õpepestendil kasutatavate veetöötlustehnoloogiate valikul lähtuti Eestis enam kasutatavatest tehnoloogiatest (vt. tabel 1). Selle põhjal valiti välja konkreetsed veetöötlustehnoloogiad, mis on koos esmaste parameetritega esitatud tabelis 2. Kasutatavad tehnoloogiad tuli mahutada võimalikult väiksele pinnale, et tagada stendi transporditavus.

Tabel 2. Veetööstlustehnoloogiate valiks koos tootlikuse parameetritega

Jrk nr.	Tähis skeemil	Tehnoloogia	Kirjeldus	Parameeter	Töösurve (bar)	Tootlikus
1.	MF.1	Mehaaniline filter	Püüab kinni suuremad lahustumata lendlevad osakesed kihtfiltratsioonil. Vältib süsteemi ummistumist ja seadmete kahjustumist.	100 µm	2-8	$Q_{\text{norm}} = 800 \text{ l/h}$
2.	F.1	Rõhk-aereerimine	Vee aereerimine surveõhuga. Vee degaseerimine, raua- ja mangaaniärastamine õhuhapnikuga oksüdeerimise teel.	$Q_{\text{air}} = 1-10 \text{ l/m}$	2-8	-
3.	F.2	Liivafilter	Püüab kinni vees mittelahustunud lendlevad osakesed mahtfiltratsioonil. On osa aeratsiooni järeltööstusest, püüdmaks kinni oksüdeerunud raua ja mangaani.	Terasuurus = 0,7-1,2 mm	2-8	$v = 8-15 \text{ m/h}$
4.	F.3	Aktiivsöe filter	Adsorbeerib vees lahustunud ained - eemaldab lõhna, maitse ja värvi.	Terasuurus = 0,6-2,36 mm, Joodiarv = 900 mg/g	2-8	$v = 10-12 \text{ m/h}$
5.	F.4	Ioonvahetus filter	Kare vesi läbib ioonvahetusvaigu (kationiit), kus Ca^{2+} ja Mg^{2+} ioonid vahetuvad Na^+ ionidega. Tulemuseks pehme vesi.	1,9 eq/L Na- tüüpi kationiit	2-8	$v = 8-40 \text{ Bv/h}$
6.	MF.2	Mehaaniline filter	Püüab kinni peenemad lahustumata lendlevad osakesed kihtfiltratsioonil. Pikendab pöördosmoosi membraani tööiga.	5 µm	2-8	$Q_{\text{norm}} = 800 \text{ l/h}$
7.	F.5	Pöördosmoos	Vee demineraliseerimine membraan protsessi toimetel.	Soolaärastusvõime - 99 %	3.4-10	$Q_{\text{perm}} = 12 \text{ l/h}$ @ 3,4 bar
8.	F.6	UV-filter	Mikroorganismid hävitatakse UV-valguse abil, sh. E. coli, Bacillus dysenteriae, koolera ja tüüfus, hepatiit ja gripp viirused, salmonelloos jne.	Lainepikkus - 253,7 nm	2-8	$Q_{\text{ef}} = 120 \text{ l/h}$

Tabelis 2 on veetööstlustehnoloogiad reastatud vees leiduvate reoaine osakeste suuruse järjekorras suurematest osakestest väikesemate osakeste suunas (tabelis ülevalt alla). Tabelis on esitatud veetööstlustehnoloogia kirjeldus, selle põhiparameeter valitud aine eemaldamisel, vajaliku töösurve vahemik ja tootlikus, mis on esitatud vooluhulgana või nõutava voolukiirusena.

Nimivooluhulga arvutus ja torustiku valik

Tabel 2 selgub hüdrauliliselt kõige kriitilisem tehnoloogia – selleks on pöördosmoos. Selle vajalik töösurve on kõrgeim ning puhta vee (permeaadi) vooluhulk (Q_{perm}) kõige väiksem. Arvestada tuleb, et pöördosmoosi (PO) membraani ummistumise vältimiseks juhitakse 60 % sisenevast toorveest veest välja kontsentraadina, seega vajatava toorvee hulk on rusikareegli järgi 1,5 korda suurem.

$$Q_{PO,vaj} = Q_{perm @ 3,4 bar} \cdot 1,5 = 12 \cdot 1,5 = 18 \frac{l}{h}$$

kus,

$Q_{PO,vaj}$ – PO toorvee vajadus (l/h),

$Q_{perm @ 3,4 bar}$ – Permeaadi vooluhulk 3,4 bari juures.

Seega, PO minimaalne vajalik vooluhulk on 18 l/h. Lähtuvalt saadud tulemusest ja ning kriteeriumist, et õppestendi peab olema võimalik käitada mahutite pealt, valiti õppestendi nimivooluhulgaks (Q_{norm}) 25 l/h. Sellise vooluhulga juures tagatakse ühe filtri töö 25 liitrise mahuti toitel üheks tunniks.

Fitingud valiti tootjalt John Guest®, mille tootevalik on lai ning mõõtmelalt väikesed fittingud, mis sobivad väikesest nimivooluhulgast lähtudes õppestendi ehitamiseks kõige paremini. John Guest® fittingud kuuluvad PN10 rõhuklassi ning nende eripäraks on *Speedfit* kiirühendused – see lihtsustab märgatavalt ehitamist, lubab vähendada stendi mõõtmeid ning muudab hooldus- ja remonttööd hõlpsaks. Torustiku baasmõõtmeks sai 3/8“, see on piisav, et tagada nimivooluhulgal 25 l/h suuremate rõhukadudeta vee voolamine ning jätab ka piisava varu. (John Guest, 2017)

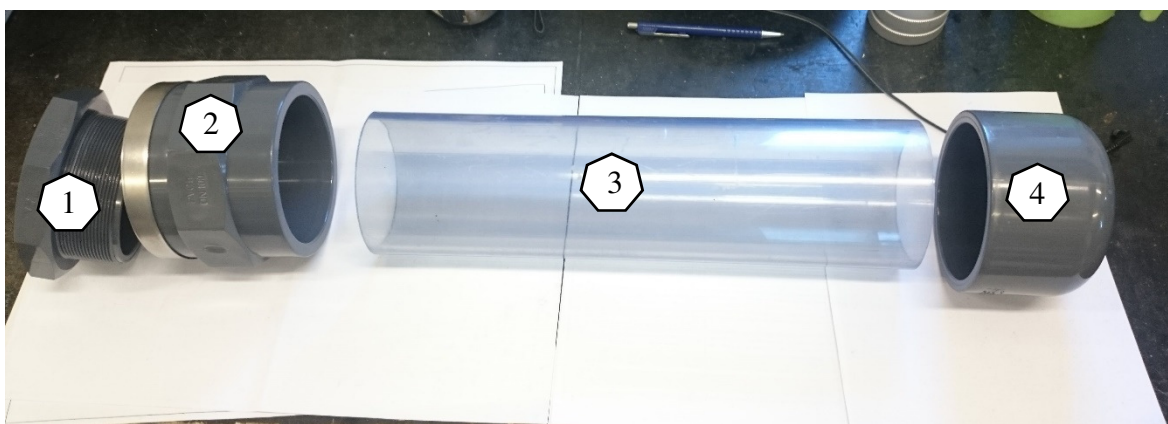
Rõhk-aeraator

Rõhk-aeratsiooni peamine eesmärk on vee rikastamine hapnikuga vees lahustunud kahevalentse raua ja mangaani oksüdeerimise jaoks, aga ka vee degaseerimiseks. Rõhk-aeraatori kavandamisel oli selge, et süsteem tuleb ehitada ise kuna puudus kaubanduses õppestendi mõõtmetele vastav aeratsiooniseade. Aeratsioonimahuti dimensioneerimiseks määratud parameetrid on tabelis 3.

Tabel 3. Rõhk-aeraatori mahuti parameetrid

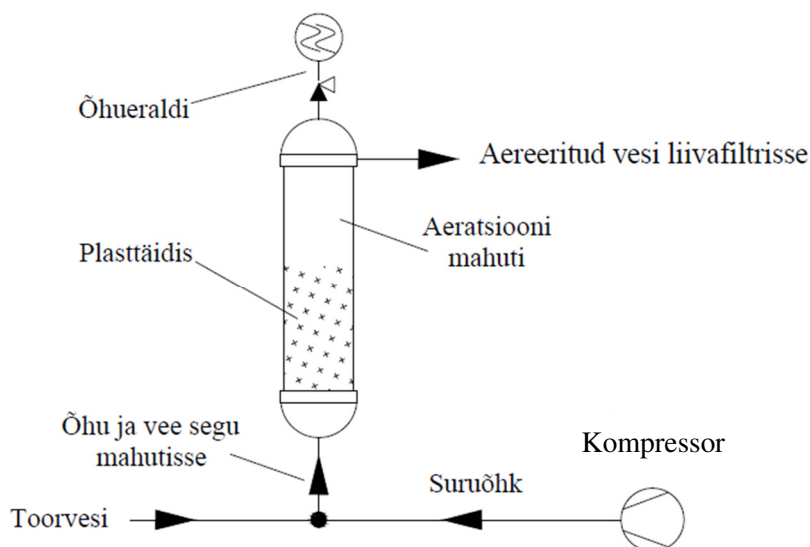
Nimetus	Väärtus
Mahuti kõrgus	400 mm
Mahuti diameeter	De 110
Norm tootlikus	25 l/h
Õhu hulk	0-10 l/m

Tabelis 3 esitatud lähteandmete põhjal valiti välja materjalid, mis koosnes põhiliselt PVC-U liimitavatest toodetest (vt. joonis 10). Kuna tegu on aeratsiooni simulatsiooniga ehk lihtsustatud kujul näidata kuidas toimub aeratsioon, siis ei pretendeeri see seade täielikule funktsionaalsusele.



Joonis 10. Rõhk-aeraatori korpus - PVC-U fittingud: otsakork 4" (1), ülemineku muhv De110/4" (2), läbipaistev PVC-U toru de110 (3), otsakork de110 (4)

Joonisel 10 nähtavad fittingte 1 ja 2 abil käib mahuti avamine. Need võimaldavad mahuti puhastamise ja hoolduse, kuna eksploatatsioonis on oht, et tekib raua ja katlakivi sade mahuti seintele.



Joonis 11. Stendi jaoks konstrueeritud rõhk-aeraatori skeem

Joonis 11 kirjeldab stendi jaoks konstrueeritud rõhk-aeraatorit, kus suruõhk lisatakse veele torustikus enne mahutisse sisenemist. Suruõhk toodetakse õlivaba kompressoriga ning õhuhulka reguleeritakse stendil asetsevast õhurotameetri reguleerventiilist. Reguleerventiiliga rotameeter on GRV21 tootjalt „Platon“ skaalaga 1-10 l/m (toote spetsifikatsioon lisas 8). Õhu ja vee segu siseneb mahutisse mahuti põhjas asuvast 3/8“ avast. Paremaks õhu ja vee segunemiseks paigaldati mahutisse plasttäidis, mis vee ja õhu tõusmisel mahuti ülaossa tekitab turbulentsi ja õhumullide peenestumist. Õhk eraldatakse mahuti tipust õhualdi abil, milleks valiti tootja „Tiemme“ 3/8“ (Art. no 1900G3403) õhualdi (tootja spetsifikatsioon lisas 9). Aereeritud veei juhatakse välja mahuti ülemise osa küljelt läbi 3/8“ ava. Väljavoolu kõrguse määramisel tuleb arvestada mahuti ülaossa tekkiva õhupadjaga, et veega ei haarataks kaasa õhku.

Teralised kolonnid

Teralisteks kolonnideks on liivafilter ja aktiivsöe filter ning teralist täidist sisaldab ka veepehmendi. Teraline filtermaterjal paigutatakse filterpadjana kolonni, kus vesi läbib materjali suunaga ülevalt alla liikudes. Kolonni dimensioneerimiseks on vaja teada filterpadja kõrgust ja diameetrit – need sõltuvad teralise filtermaterjali omadustest. Kasutatavate filtermaterjalide loetelu on esitatud tabelis 4.

Tabel 4. Teraliste filtermaterjalide loetelu koos parameetritega

Veetöötlus-seade	Filtermaterjali tüüp	Filtermaterjali tootja ja mark	Parameeter		Terade suurus	Filterpadja min. kõrgus (h_{min})
			Nimetus	Väärtus		
Liivafilter	Liiv	Kremer Zanden Grind - Kuivatatud ja sõelutud liiv 0.7-1.25	Terasuurus	0,7-1,25 mm	0,7-1,25 mm	10 d
Aktiivsöe filter	Aktiivsüsi kookospähkli koorest	Desotec – ORGANO-SORB® 9-CO	Joodiarv	900 mg/g	0,6-2,36 mm	10 d
Vee-pehmendi	Kationiit Na^+	Purolite® - C100E	Ioonvahetus võime	1,9 ekv/l	0,3-1,2 mm	600 mm

Tabelis 4 on toodud välja filtermaterjali tüüp, tootja nimi ja mark ning vajalikud parameetrid filterpadja dimensioneerimiseks. Ainukesena on tootjapoolt määratud kationiidi filterpadja minimaalne kõrgus. Filtermaterjalid valiti Miridon OÜ tootevalikust ning konsulteeritud filtermaterjali sobilikust kõnealuste filtrite puhul.

Kuna projekteeritavad filtrid suuresti erinevad mõõtmete poolest täismõõdus filtritest ning on mõeldud kasutamiseks õppe-eesmärgil /laboraatorsetes tingimustes, siis tuleb filterpadja diameetri arvutamisel kontrollida, et filtermaterjalis ei tekiks otsevoolu e kanaliseerimist ja seinä-efekti (vee voolamine pindpinevuse toimel mööda mahuti siseseina). Vältimaks sellise soovimatu efekti tekkimist peab mahuti diameeter (d) olema suurem, kui $50 d_{tera,eff}$ ($d_{tera,eff}$ – filtermaterjali efektiivne terasuurus). (Baquero & Bruggen, 2008)

Liivafiltri minimaalse sisediameetri arvutus:

$$d = d_{tera,eff} \cdot 50 = 1,0 \cdot 50 = 50 \text{ mm}$$

kus,

d – Liivafiltri mahuti sisediameeter;

$d_{tera,eff}$ – Liiva efektiivne terasuurus.

Aktiivsöe filtri minimaalse sisediameetri arvutus:

$$d = d_{tera,eff} \cdot 50 = 0,7 \cdot 50 = 35 \text{ mm}$$

kus,

d – Aktiivsöe filtri mahuti sisediameeter;

$d_{tera,eff}$ – Aktiivsöe efektiivne terasuurus.

Veepehmendi minimaalse sisediameetri arvutus:

$$d = d_{tera,eff} \cdot 50 = 0,75 \cdot 50 = 38 \text{ mm}$$

kus,

d – Veepehmendi mahuti sisediameeter;

$d_{tera,eff}$ – Aktiivsöe efektiivne terasuurus.

Saadud tulemuste põhjal järeldati, et kõige väiksem lubatud mahuti sisediameeter on aktiivsöe filtril (35 mm) ning kõige suurem liivafiltril (50 mm). Kuna soov on saada ühesuurused kolonnid, siis mahuti materjali valikul lähtuti suurimast lubatavast minimaalsest sisediameetrist ehk liivafiltri diameetrist – selleks on 50 mm.

Filterpadja minimaalne kõrgus (h_{min}) arvutatakse suhtest 10 d , kui ei ole filtermaterjali tootja poolt määratud teisiti (Baquero & Bruggen, 2008). Antud juhul on Purolite poolt määratud veepehmendi filterpadja miinimumkõrgus (tabel 4) 600 mm, aktiivsöe filtri ja liivafiltri puhul seda tootja juhistest ei selgunud, seega on lähtutud nende filtrite puhul eelpool mainitud 10-kordsest diameetri suhtest.

Liiva filterpadja minimaalse kõrguse arvutus:

$$h_{min} = d \cdot 10 = 50 \cdot 10 = 500 \text{ mm}$$

kus,

h_{min} – Liiva filterpadja minimaalne kõrgus;

d – Liivafiltri mahuti minimaalne sisediameeter.

Aktiivsöe filterpadja minimaalse kõrguse arvutus:

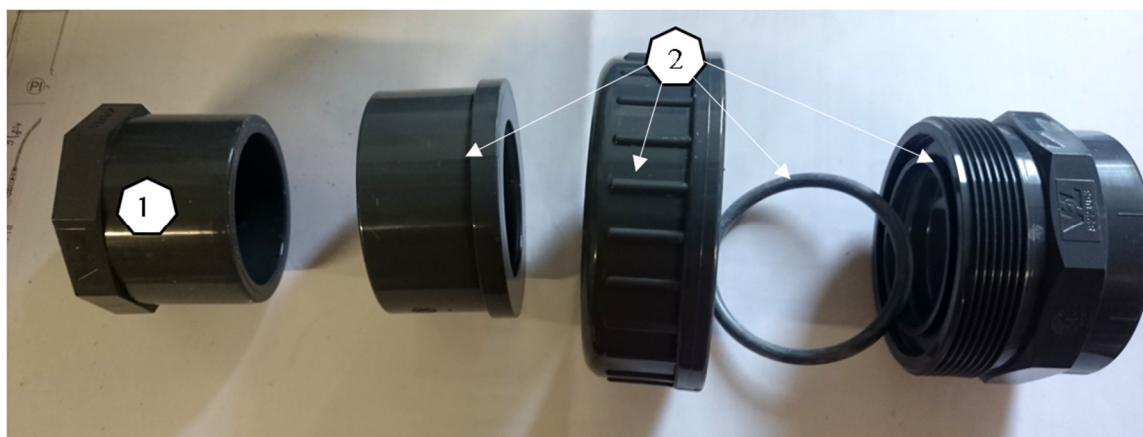
$$h_{min} = d \cdot 10 = 35 \cdot 10 = 350 \text{ mm}$$

kus,

h_{min} – Aktiivsöe filterpadja minimaalne kõrgus;

d – aktiivsöe filtri mahuti minimaalne sisediaameeter.

Saadud tulemuste põhjal komplekteeriti teralise filtermaterjali kolonnid De 63 PVC-U fittingutest ja torust (joonis 12), mille sisediaameeter on 53,7 mm (Praher Plastiks, 2017). Kolonni kasulikuks kõrguseks jääb 600 mm ehk veepehmendi filterpadja minimaalne kõrgus.



Joonis 12. Teralise filtermaterjali kolonni otsa fittingud: üleminek De 63-1/2" sisekeere (1), union (2)

Joonisel 12 on näha De 63 unione (komplekt 2), mille abil saab hõlpsasti avada teralise filtermaterjali kolonnide otsad. See on vajalik kuna õppestend ei võimalda ruumi kokkuhoiu mõttes tagasipesu või regenereerimist. Ammendunud või ummistunud filtermaterjal vahetatakse uue, mujal regenereeritud või tagasipeetud materjali vastu.

Teraliste kolonnide tootlikkuse arvutus

Teralise täitega kolonnidest liivafiltril ja aktiivsöe filtril sõltub tootlikus filterpadja diameetrist ($D_i = 53,7 \text{ mm}$) – nende voolukiirus filterpadja ristlõikes peab jääma etteantud piiridesse. Veepehmendil tootlikus on määratud hüdraulilise koormuse abil ehkioonvahetit läbiva, materjaliga võrdse, vedeliku kogus tunnis (*bed volume per hour*). Veepehmendi dimensioneerimisel tuleb määrata ka ionnvahetus materjali töösükli kestlikus, pärast mida tuleb materjal regenereerida. Tootlikuse parameetrid on esitatud tabelis 2, kationiidi ionnvahetus võime on esitatud tabelis 4.

Kolonna ristlõikepinda arvutus:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{53,7}{2}\right)^2 = 2256 \text{ mm}^2$$

Kus,

A – ristlõikepind (mm^2);

D_i – kolonna siseläbimõõt (mm).

Kolonna voolukiiruse arvutus vooluhulgal 25 l/h:

$$V = \frac{q}{A} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{2256 \cdot 10^{-6}} = 11,08 \text{ m/h}$$

Kus,

V – voolukiirus (m/h);

A – ristlõikepind (mm^2);

q – nimivooluhulk (l/h).

Arvutustest selgub, et kolonnis De 63 jäävad voolukiirused liivafiltris ($v = 8\text{--}15 \text{ m/h}$) ja aktiivsöe filtris ($v = 10\text{--}12 \text{ m/h}$) lubatu piiresse. Liivafiltri tehnilised andmed on esitatud tabelis 5, aktiivsöe andmed on esitatud tabelis 6.

Tabel 5. Liivafiltri tehnilised andmed

Täide	
Tootja	Kremer Zand en Grind
Nimi	Kuivatatud ja sõelutud liiv 0.7-1.25
Terasuurus	0,7-1,25 mm
Tihedus	1,5 g/cm ³
Täite kaal	2,03 kg
Kolonn	
Materjal	PVC-U PN16 De63, läbipaistev
Diameeter	53,6 mm
Ristlõike pindala	2256 mm ²
Kasulik kõrgus	600 mm
Maht	1,35 l
Tootlikus	
Vooluhulk	25 l/h (18-34 l/h)
Voolu kiirus	11 m/h (8-15 m/h)
Viibeaeg	3,3 min (4,5-2,4 min)

Tabel 6. Aktiivsöe filtri tehnilised andmed

Täide	
Tootja	Desotec
Nimi	ORGANOSORB® 9-CO
Joodiarv	900 mg/g
Terasuurus	0,6-2,36 mm
Tihedus	0,55 g/cm ³
Täite kaal	0,74 kg
Kolonn	
Materjal	PVC-U PN16 De63, läbipaistev
Diameeter	53,6 mm
Ristlõike pindala	2256 mm ²
Kasulik kõrgus	600 mm
Maht	1,35 l
Tootlikus	
Vooluhulk	25 l/h (23-27 l/h)
Voolu kiirus	11 m/h (10-12 m/h)
Viibeaeg	3,3 min (3,6-3 min)

Tabelid 5 ja 6 esitavad andmed liivafiltri (tabel 5) ja aktiivsöe filtri (tabel 6) täitematerjali, kolonni materjali ja mõõtude ning töotlikuse kohta. Tehniliste andmete tabelitest saab ka teada täite kaalu kolonni kohta, et lihtsustada kolonnide täitmist filtermaterjaliga.

Veepehmendus kolonni hüdraulilise koormuse arvutus:

$$HK = \frac{Q}{V} = \frac{25}{1,35} = 18 \text{ Bv/h}$$

Kus,

HK – hüdrauliline koormus (Bv/h);

V – kolonni maht (l);

Q – nimivooluhulk (l/h).

Kationiidi töötssükli kestvuse arvutus:

$$V_{p.vesi} = \frac{(V \cdot C)}{L} = \frac{(1,35 \cdot 1,9)}{8} \cdot 1000 = 320,6 \text{ l}$$

Kus,

$V_{p.vesi}$ – pehme vee kogus (l);

V – kolonni maht (l);

C – kationiidiioonvahetus võimsus (ekv/l);

L – toorvee karedus (ekv/l).

Tehtud arvutustest järeldame, et veepehmendus kolonni hüdrauliline koormus jääb lubatu (8-40 Bv/h) piiresse ning pärast 320 l vee pehmemdamist tuleb kationiit välja vahetada või regenereerida. Veepehmendi tehnilised andmed on esitatud tabelis 7.

Tabel 7. Veepehmendi tehnilised andmed

Täide	
Tootja	Purolite®
Nimi	C100E
Ioonsus	Na ⁺
Ioonvahetusvõimsus	1,9 ekv/l
Terasuurus	0,3-1,2 mm
Tihedus	0,84 g/cm ³
Täite kaal	1,13 kg
Mahuti	
Materjal	PVC-U PN16 De63, läbipaistev
Diameeter	53,6 mm
Ristlõike pindala	22,56 cm ²
Kasulik kõrgus	600 mm
Maht	1,35 L
Tootlikus	
Vooluhulk	25 l/h (10,8-54 l/h)
Hüdrauliline koormus	18 Bv/h (8-40 Bv/h)
Voolu kiirus	11 m/h (4,8-23,9)
Viibeag	3,3 min (7,5-1,5min)
Töotsükli kestvus	320l

Tabelis 7 on esitatud tehnilised andmed veepehmendi täitematerjali, kolonni materjali ja mõõtude ning tootlikuse kohta. Tehniliste andmete tabelitest saab ka teada kationiidi kaalu kolonni kohta ja töötsükli kestvuse liitrites.

Materjalide valik

Materjalide valik on esitatud lisa 2 (lisa 2 - Õppestendi spetsifikatsioon). Materjalid ja fittingud valiti Miridon OÜ tootevalikust ning on valitud maksimum vooluhulgale 100 l/h. Maksimum vooluhulk on saadud arvestudega, mis võimaldab töödada neljal filtril rööbiti (4*25 = 100 l/h)

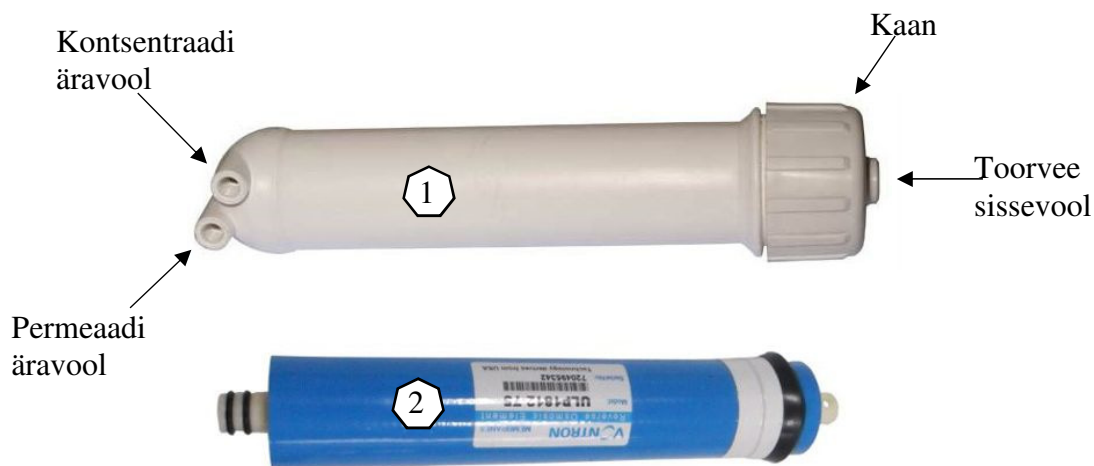
Pumpadeks valiti kaks M1207515 membraanpumpa tootjalt „Aqua Filter“ (spetsifikatsioon lisa 4). Üks pump on mõeldud mahutitelt toiteks ning teine on rõhu tõstmiseks enne pöördosmoosi. Pumba nimivooluhulk on 1,5 l/min (90 l/h), maksimum töö rõhk 5,5 bar. Pumba toide on 1,2A 24V / DC. Pumba toide saadakse stendi jaotuskilbist.

Rotameetrid valiti tootjalt „Georg Fischer Piping System“. Rotameetri skaala valiti nii, et rotameetrit läbia keskminese vooluhulga väärtus jääks skaala keskele. Rotameetri valikud ja kogused on esitatud õppestendi spetsifikatsioonis (lisa 2). Valikus oli ka täpsemaid rotameetreid, mis on mõeldud laboritesse, kuid valituks saanud rotameetrite eelis oli nende lihtsus ja otsmised ühendused – neid on võimalik avada ja puhastada.

Reguleerventiilid sai valitud messingist nõelventiilid tootjalt „END-Armaturen“. Reguleerventiilide mõõdud said valitud vastavalt torustiku suurusele (3/8“ ja 1/4“), millele reguleerventiil paigaldati. Reguleerventiilide spetsifikatsioon on lisa 6.

Manomeetrid valiti 0-6 bar ja 0-10 bar skaalaga. Manomeetrid 0-10 bar skaalaga paigaldati 5 µm mehaanilise filtri ette ja taha ning pöördosmoosi ette, kuna nendes punktides mõjub rõhutõstepumba täiendav rõhk. Manomeetritel on 1/4" altühendus. Manomeetrite spetsifikatsioon on lisa 13.

Pöördosmoosi seade koosneb kahest detailist – korpusest (1) ja spiraalmembraanmoodulist (2) (vt joonist 8). Spiraalmembraani lõiget ja seadmes toimuvat on kirjeldatud joonisel 8.



Joonis 13. Pöördosmoosi seadme detailid: 1 – korpus, 2 – spiraalmembraanmoodul (joonis on illustratiivne)

Joonisel 13 kujutatud mooduli (2) vahetamine käib läbi korpuse (1) kaane, mis on lahti keeratav. Toorvesi pääseb sisse läbi korpuse kaanes oleva 1/4" ühenduse ning permeaat ja kontsentraat voolavad ära läbi korpuse teisest otsas olevate 1/4" ühenduste. Spiraalmembraanmoodul, mille tähis on BW60-1812-75, valiti tootjalt „Dow Filmtec“. Membraani vooluhulk on 3,4 bar'i juures 12 l/h ning seade võimaldab kinni pidada 99 % sooladest. Spiraalmembraanmooduli spetsifikatsioon on lisas 14.

Kasutatava UV-seadme FUV-P5 „Aquafilter“ andmed on esitatud tabelis 8.

Tabel 8. UV-seadme tootja tehnilised andmed (Aquafilter, 2017)

Tootja	Aquafilter
Mudel	FUV-P5
Lainepikkus	253,7 nm
Voolukiirus	120 l/h
Lambi võimsus	6 w
Ühendused	1/4" SP
mõõtmed	1,9" x 11"

Stendi kujundamine

Õppestendi projekteerimise juures oli üks oluliseimaid ja aega nõudvamaid etappe ruumilise lahenduse läbi mõtlemine. Kui kasutatavad materjalid ja veetöötluseks vajalikud seadmed koos tehnoloogilise skeemiga olid selgeks mõeldud, tuli see komplekt paigutada võimalikult väiksele pinnale, et oleks tagatud õppestendi transporditavus. Õppestendi mõõtmete valikul lähtuti, et stend mahuks ülesseatuna läbi ühiskondliku ruumi ukse (so 900 x 2100 mm), stendi pikkus oleks alla 2 m ning transpordiasendis mahuks stend Volkswagen Transporteri mõõtmetega kaubikusse. Välitmaks ehitamise käigus võimalikke üllatusi, otsustas autor mõõta üle fittingute gabariidid ja joonistada need sisse CAD joonestusprogrammis. Programmi joonestatud fittingud seati paneeli osas skeemi järgi ülesse ning pärast mitmete lahenduste läbi mängimist saadi järeldused:

- a.) Filtrite asetus koos reguleerimisskeemiga paneelil ühel külje ajas paneeli liiga pikaks. Paneeli pikkuseks saadi 2,3 m ning kõrguseks 1,2 m, kuhu lisandub juurde alusraami kõrgus.
- b.) Õppestend tuleks seetõttu ehitada kahepoolse paneeliga – ühel pool seadistamise mehanismid ning teisel pool filtrid.
- c.) Õppestendi paneel peab olema transpordi ajaks alusraamilt eemaldatav.

Seega asuti töötama kahepoolse paneeli kujundamise kallal. Pärast fittingute kataloogidega põhjalikku tutvumist ning pärast uute lahenduste leidmist saadi paneeli pikkuseks 1,7 m. Paneeli vaated on lisas 15.

Õppestendi alusraam keevitatakse kokku roostevabast terasest. Raami põhjapinna mõõtmeteks on 1700 x 850 mm. Raam on kahetasandiline, mille alumisele tasandile paigaldatakse näiteks kompressor, mahutid ja pumbad – mahutite ja raksema varustuse paigaldamine alumisele tasandile tagab kogu õppestendi stabiilsuse ja väldib ümber kukkumist. Raami teine tasand koosneb kitsast tööpinnast ja rennist, mis paikneb paneeli all ning ulatub paneelist eemale – proovikraanide poolel 300 mm ning filtrite poolel 200 mm. Renni ülesanne on koguda kokku proovikraanidest ja filtrite hooldamise või tühjendamise käigus tulev vesi ning juhtida see kanalisatsiooni või selleks ettenähtud mahutisse. Raami peale kinnitub filtrite paneel, mis paigutatakse selleks ettenähtud postidele karp-karbis meetodil ning fikseeritakse poltidega. Raami küljes on veel täiendav stange, kuhu külge kinnituvad proovikraanid ja jaotuskilp ning veearvesti koos mehaanilise filtriga (M.F 1). Raami eskiis on esitatud lisas 16.

Roostevabast raami ei jõutud enne magistritöö esitamist ära tellida ning valmis ehitada, kuna arvestades roostevaba raami hinda, peeti otstarbekamaks seda mitte kiirustades teha.

3.3. Ehitamine

Õppestend ehitati Miridon OÜ töökojas, mis tagas materjalide kiire hankimise ja tehnilise toe nii juhendamise kui ka töövahendite osas. Õppestendi ehitamise alustamisel pidas autor oluliseks komplekteerida paneel algul vineerist alusel, et määrata ära täpselt kolonnide ja filtrite kinnitus kohad, ülekontrollida ruumiline paigutus ning välistada võimalikud

üllatused mida töö autor ei oska projekteerimisel kogenematuses ette näha. Nagu töökäigus selgus, siis vineerist alusel oli muudatusi lihtne teha ning hoiti ära suured kulutused roostevaba raami ümber tegemisel.

Ehituse võib jagada tegevuste järgi kolmeks – ettevalmistustööd, paneeli komplekteerimine vineeril ja õpestendi komplekteerimine raamil.

Ettevalmistus töid saab jaotada fittingute tüüpide järgi kolmeks:

- a.) PVC-U fittingute liimimine – nende ühendustega koostati teralise filtermaterjaliga kolonnid ja paigaldati rotameetritele rotameetrite üleminekul JG ühendustele. PVC-U ühenduste liimisel tuli esmalt liimpinnad töödelda hoolikalt lahusega, et eemaldada PVC kergelt õline kaitsekiht ning seejärel sai pintsliga peale kanda liimi mis on spetsiaalselt PVC liimimiseks ettenähtud. Pärast liimi peale kandmist tuli osad omavahel kohe kokku suruda, kuna liim kuivas suhteliselt kiiresti võis tekkida oht, et ei jõua ühendusi piisavalt sügavale pesasse suruda.



Joonis 14. PCV-U ühenduste liimimise protsess: 1 - spetsiaalne lahusti ja liim, 2 - lahustiga töödeldud detailid, 3 - liimiga töödeldud detail, 4 - liimitud detailid

Joonisel 14, kus on kujutatud liimimise protsessi kolmes etapis ja liimimise vahendeid, näidatakse kuidas liimitakse kokku rotameetri tarbeks De 16 üleminekuid 3/8“ väliskeermele.

- b.) Keermestatud fittingute pakkimine – Keermestatud fittingute pakkimist tuli ette kõige rohkem seadmetele üleminekute paigaldamisel. Keermete pakkimist teostati spetsiaalse silikon määrdega Loctite® SI5331'ga. Keermete pakkimine eeltöötlust ei vajanud, tuli ainult määrda mõlema poole keermed ühtlaselt silikoniga kokku ning need omavahel mõõduka jõuga kokku keerata. Kohe pärast ühenduse kinni keeramist tuli eemaldada liigne silikon, mis keermevahelt välja pressis.



Joonis 15. Keermestatud fittingute pakkimine: 1 - keermete määrimine silikoniga, 2 - ühendatud fittingud

Joonisel 15 on näha teralise filtermaterjaliga kolonni sisse-/väljavoolu 3/8“ JG ülemineku paigaldamine. Esimesel pildil on näha silikooniga töödeldud JG üleminek ja kolonni põhi ning teisel ühendatud keermed.

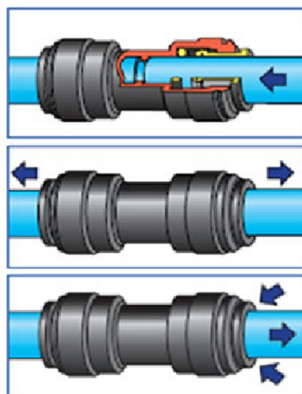
- c.) John Guest® (JG) fittingute ühendamise – JG kiirühendusi kasutati õppestendi koostamisel kõige rohkem - üle 350 JG fittingu. JG kiirühendusega fittingute paigaldamine oli kiire ja lihtne, kuna fittingud ei vajanud eelnevat töötlust, küll aga vajasis töötlust 3/8“ PVC torude otsad, mis oli vaja faasida 45 kraadi alla, kuna töötlemata toru lõikekoht võis raskendada ühenduste tegemist, lisaks töötlesin PVC toru otsad libestava silikonmäärdega, et hõlpsustada hilisemat lahti ühendamist.

Ühendamisel:

1. Lükka toru lõpuni ühenduse sisse;
2. Kontrolli toru kinnitumist toru tagasi tõmmates.

Lahti ühendamisel:

1. Vajuta alla toru ümbritsev rõngas, ning tõmba toru välja.

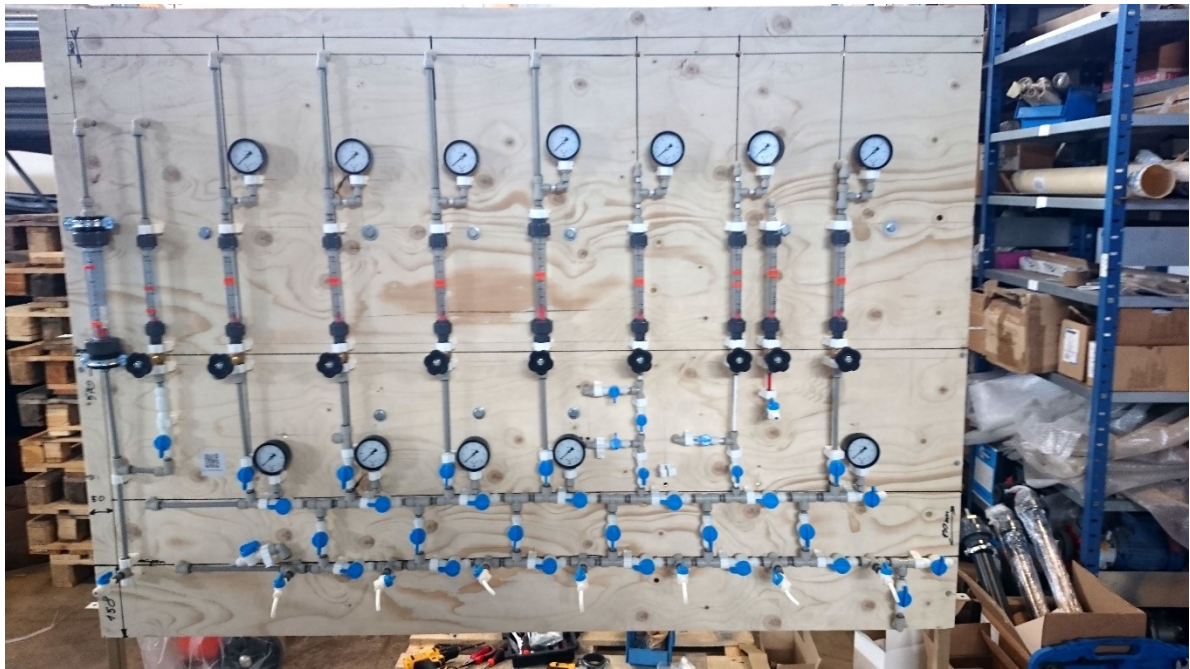


Joonis 16. JG fittingute ühendamise ja lahti ühendamise (John Guest, 2017)

Joonisel 16 kirjeldatakse kuidas teostada JG fittingute ühendusi ja lahti ühendamist.

Õppestendi ehitamise käigus oli JG fittingute lahtiühendamisel suureks abiks leht võti – 3/8“ puhul võti nr 10 ja 1/4" toru puhul nr 8 võti.

Paneeli komplekteerimine koosnes mõõtmistöödest, reguleerimisarmatuuri ja seadmete paigaldamisest. Esmalt laoti kokku voolusuunade reguleerimise liini. Liin koosnes paralleelselt kahes reas asuvatest ventiilidest ja põlvedest mida ühendasid 45 mm 3/8“ PVC toru jupid, iga fittingu vahele jäi näha 10 mm torujupp, mis tagas ligipääsu lahti ühendamiseks ning jättis ruumi kinnitusklambrile, millega armatuur paneeli külge kinnitub. Reguleerimisliini koostamisel lähtuti eelnevalt välja joonistatud paneeli vaadetest (lisa 15). Kui reguleerimisliin oli komplekteeritud, siis sai mõõta välja paneeli suhtes vertikaalselt olevad filtri toiteliinide asukohad. Filtri toiteliinil asusid reguleerventiil, rotameeter ja manomeeter, toiteliini ülemine ots läbib paneeli, kus siseneb toidetavasse filtrisse. Rotameetrid, ventiilid ja manomeetrid paigaldati esteetilisuse mõttes kõik ühele joonele. Kui paneeli reguleerimiskülge oli paigas, sai välja arvestada teisel küljel asuvate filtrite asukohad ning nende klambrite asukohad, mis oli paneeli vineeri peale kokkupanemise eesmärk. Edaspidiseid ühendused filtrite tagaküljel tehti vabalt, kuna tagaküljel oli reguleerimisarmatuuri minimaalselt. Ülejäänud seadmed, mis jäid paneeli alla, paigaldati ajutiselt euroalusele, ning ühendati skeem kokku, et teha survekatsed. Ajutiselt vineertahvlile kinnitatud stend täitis eesmärgi.



Joonis 17. Õppestendi valmidus 24.05.2017 – eestvaade



Joonis 18. Õppestendi valmidus 24.05.2017 – tagantvaade

Joonistel 17 ja 18 on näha õppestendi valmidus 24.05.2017. Paneeli esimeselt küljelt on puudu õhurotameeter ja kaks manomeetrit ning tagaküljel vajab väljaehitamist aeratsiooni süsteem ja viimaste voolikute ühendamist.

Edaspidine viimistlus, juhendi vormistamine ja stendi täpsem testimine toimub Magistritöö väliselt, ning selle viib lõpuni autor. Järgmisteks ülesanneteks on:

- a.) Veenduda õppestendi toimimises;
- b.) Joonestada ja tellida roostevabast raam;
- c.) Komplekteerida õppestend ümber roostevabast raamile ning viimistleda tulemust;
- d.) Katsetada läbi õppestendi võimalused;
- e.) Koostada õppestendi kasutus- ja hooldusjuhend.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärk oli tutvustada levinumaid veetöötlusmeetodeid ning projekteerida ja ehitada õppestend, mille abil praktiseerida vee omaduste muutmist ning demonstreerida, et vee omadusi on võimalik väga suurtes piirides muuta, kohandades seda tarbija vajadustele vastavaks. Õppestendiga soovitakse täiustada veetöötlustehnoloogiata õppekvaliteeti, kuna on ilmne, et valdkonnas on pidev nõudlus selle eriala spetsialistide järele ning EMÜ Veemajanduse osakonnas ei olnud seni ajakohased praktikavahendid piisavad. Ka soovitakse suurendada elukutset valivate noorte hulgas huvi vesiehituse ja veekaitse eriala vastu.

Õppestend projekteeriti ja ehitati nii, et peamised olmevee töötlemises kasutatavad veetöötlustehnoloogiad oleks esindatud. Õppestendil kasutatavad veetöötlustehnoloogiad on mehaanilised filtrid poorsusega 100 µm ja 5 µm, rõhk-aeratsioon rauaärastuseks, liivafilter, aktiivsöe filter, veepehmendi, pöördosmoos ning UV-seade.

Õppestendi projekteerimisel peeti tähtsaks:

- Kolonnide läbipaistvust, st läbipaistvas korpusas asuva filtri, sõela või muu seadme sisu ja protsess peab olema nähtavad.
- Oleks tagatud veetöötlusmeetodite järjestikune või ristikasutus, luues võimaluse rakendada filtreid üksikult, jadamisi, rööbiti, tehnoloogiliste paaridena ning võimaldades erinevalt töödeldud vee segunemist kollektor torustikus.
- On lihtsasti teisaldatav, mõõtmetelt väike ja omab mahutitelt toidet, et stendi oleks võimalik kasutada vee-eriala tutvustamiseks õpilasmessidel, üldhariduskoolides ja gümnaasiumites, veepäevadel ja näitustel.

Õppestend ehitati valmis magistritöö autori poolt Miridon OÜ töökojas. Õppestendi katsetati realsetes oludes, et kontrollida püstitatud eesmärkide täitumist. Õppestend täitis funktsionaalsuselt seatud eesmärged, kuid selle juurde tuleb veel koostada juhend ning kõik sõlmed sildistada. Stendi kasutamiseks õppetöös tuleb eelnevalt teha täiendavaid katseid.

Õpepestend jääb käiku igapäevaelus õppe- ja teadustöös ning sellel on ette näha väga suur roll insenerierialade õpetamisel EMU-s. See võimaldab reklaamida veemajanduse, veekaitse, vesiehituse eriala ja tervikuna EMU-d, aitab parandada veemajanduse osakonna järelkasvu ning võimaldab luua sidemeid üldhariduskoolide ja gümnaasiumitega. On oodata, et paraneb olmevee puhastamise tehnoloogiate õpetamise tase, areneb üliõpilaste käeline tegevus, paraneb side vilistlastega, muudab võimalikuks EMU-siseselt pakkuda laboritele ja töökodadele spetsiifiliselt muudetud omadustega vett, loob juurde võimalusi tulevaste magistratööde teostamisele veepuhastus valdkonnas.

SUMMARY

The aim of this work is to demonstrate the most common water treatment methods and to design the stand for educational use which allows to practice changing the water properties depending on the needs of consumer. Educational stand serves to improve the learning quality of water treatment technology, as it is obvious that there is continuous demand for specialists of that field and the timely practice tools in Estonian University of Life Sciences' Department of Water Management have not been sufficient. Also, it is a way to increase interest for Hydraulic Engineering and Water Pollution Control specialities among young people who are choosing a profession.

Education stand was designed and built in a way that represents main water processing technologies used to process household water. The water processing technologies used on the educational stand are mechanical filters with a porosity of 100 μm and 5 μm , pressurised aeration for iron removal, sand filter, activated carbon filter, water softener, reverse osmosis and UV-device.

In designing educational stand, it was considered important that:

- Columns are transparent – the interiors and processes of sieves, filter and other devices should be seen through the case.
- Sequential or cross-usage of water treatment methods is guaranteed, this creates an opportunity for using filters individually, in series, in parallel, as technological pairs and enables to mix differently processed water in collector piping.
- It is easily portable, small and could use water from containers, so that the stand could be used for introducing the water speciality in studentfairs, schools, water days and exhibitions.

Educational stand was constructed by the author of this master's thesis in the workshop of Miridon OÜ. The stand was tested in real situations to verify the fulfillment of set objectives.

Educational stand filled all functional purposes, but there is also a need developing guideline instructions and labelling nodes.

Educational stand will be used in everyday studies and research and it will have a big role in teaching the engineering speciality students in Estonian University of Life Sciences. This will allow to advertise Water Management, Water Pollution Control, Hydraulic Engineering and Estonian University of Life Sciences as a whole, also help improve the aftergrowth of the Department of Water Management and allows to create links with schools. It is expected that the level of teaching the household water purification technologies will rise, students' manual activity will progress, connection with alumni will improve. This will give an opportunity to supply laboratories and workshops with water, that has specific properties and creates more possibilities for future research in the field of water pollution control.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Baquero, O. F., Bruggen, B. V.** (2008). Design of an activated carbon columns plant for studying micro-pollutants removal. (Research study). Katholieke Universiteit Leuven. Leuven.
2. **Birk, K.** (2010). Eesti joogivesi 2010. aastal – *Keskkonnatehnika*. Nr 6, lk 11-14.
3. Bungay. (2006). Rensselaer Polytechnic Institute: <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/FILTRATION/sand.htm> (29.04.2017).
4. **Droste, R. L.** (1997). Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment. New York: John Wiley & Sons, Inc. 800 pp.
5. EVS-847-2:2016. Eesti Standardikeskus: <https://www.evs.ee/tooted/evs-847-2-2016> (09.05.2017).
6. Grozine. (2014). RO Filters for Hydroponics Understanding Reverse Osmosis. Grosine LTD: <http://www.grozone.com/2014/03/02/ro-filters-hydroponics-understanding/> (19.05.2017).
7. Joogivee kvaliteedi- ja kontrollinõuded ning analüüsimeetodid. Sotsiaalministri määrus 31.07.2001 nr 82. RT I, 24.11.2015, 4
8. **Johannes, E.** (2009). Veekäitlus soojuselektrijaamades – *Keskkonnatehnika*. Nr 9, lk 12-14.
9. John Guest. Kataloog: <http://www.johnguest.com/wp-content/uploads/2015/01/Drinks-Brochure-Z2105-87-0217-WEB.pdf> (03.05.2017).
10. **Karu, J.** (2016). Veevärk. Tallinn: TTÜ Kirjastus. 199 lk.
11. **Kiidjärv, K.** (2009). Vee kvaliteet ühisveevarustuses kasutatavates põhjaveekihtides Tartu regioonis ning sellega kaasnevate probleemide analüüs. (Magistritöö). TTÜ Keemiatehnika Instituut. Tallinn.
12. **Leena Albreht** (2004). Viru-Peipsi alamvesikonna joogivee tervisekaitseline hinnang: (Magistritöö). TÜ Tervishoiu instituut. Tartu
13. **Marandi, A., Kattel, T.** (2010). Vesi, geoloogia ja kaevude puurimine – *Keskkonnatehnika*. Nr 3, lk 21-24.
14. Miridon OÜ. Veepehmendus. <http://www.miridon.ee/veepehmendus/> (15.05.2017).
15. Ondeo-Degremont. (2002). Water Treatment Handbook, 6th Edition.
16. Praher Plastiks. PVC-U Pipes PN16. Praher Plastiks: <https://www.praher-plastics.com/product/praher-pressure-pipes-pvc-u-without-socket-pn16-transparent/> (23.05.2017).
17. Purolite Corporation. Purolite Engineering Bulletin: <http://www.purolite.com> (12.05.2017).

18. **Zimmermann, A., Põldsepp, H.** (2002). Veeressursside kasutamisest. Valga: OÜ Gersamia. 126 lk.
19. Terviseamet. Joogivesi tarbijale. <http://www.terviseamet.ee/keskkonnatervis/vesi.html> (17.05.2017).
20. **Teunissen, K.** (2007). Iron removal at groundwater. (Master thesis). Water Management. Delft University of Tehnology. Delft.
21. **Urbanovitš, R.** (2011). Värvuse eemaldamine pinnaveest veetötluse abil. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
22. Waterprofessionals. Reverse Osmosis: <http://www.waterprofessionals.com/learning-center/reverse-osmosis/> (15.05.2017).

LISAD

Lisa 1. Tehnoloogiline skeem

Lisa 2. Õppendi spetsifikatsioon

Lisa 3. Skeemi ühendamise jadamisi variandis 1

Lisa 4. Skeemi ühendamine jadamisi variandis 2

Lisa 5. Skeemi ühendamine rööbiti variandis 1

Lisa 6. Skeemi ühendamine rööbiti variandis 2

Lisa 7. Skeemi ühendatud aeratsioon paaris liivafiltriga

Lisa 8. Õhu rotameeter „Platon“ spetsifikatsioon

Lisa 9. Õhueraldi „Tiemme“ spetsifikatsioon

Lisa 10. Membraanpump „Aquafilter“ spetsifikatsioon

Lisa 11. Rotameeter „GF“ spetsifikatsioon

Lisa 12. Nõelventiil 1/4" ja 3/8" „END-Armateur“ spetsifikatsioon

Lisa 13. Manomeeter „Manomer“ spetsifikatsioon

Lisa 14. PO spiraalmoodul BW60-1812-75 „DOW“ spetsifikatsioon

Lisa 15. Õppestendi paneeli vaated

Lisa 16. Õppestendi raami eskiis